CAPITOLO

1

Che cos'è un essere vivente. Il microscopio e la teoria cellulare

Ogni cellula che vedrai al microscopio è figlia di un'altra cellula, in una catena che non si è mai interrotta dalla comparsa della vita sulla Terra.

OBIETTIVI

1. Riconoscere le caratteristiche comuni a tutti i viventi e discutere i casi limite.
2. Ordinare i livelli di organizzazione della vita, dalla molecola alla biosfera.
3. Analizzare gli esperimenti di Redi, Spallanzani e Pasteur come esperimenti controllati.
4. Usare µm e nm e calcolare il rapporto superficie/volume di una cellula.
5. Usare il microscopio ottico, calcolare ingrandimento e dimensioni reali, distinguere ingrandimento e risoluzione.
6. Enunciare la teoria cellulare e ricostruirne la storia.

INDICE DEL CAPITOLO

1.1 La biologia e le caratteristiche dei viventi 2
1.2 I livelli di organizzazione 4
1.3 La vita nasce dalla vita 5
1.4 Le dimensioni del mondo cellulare 9
1.5 Il microscopio 11
1.6 La teoria cellulare 15

Scienze naturali 2 · Parte I · La cellula · versione 1.0
Capitolo 1: Che cos'è un essere vivente. Il microscopio e la teoria cellulare · pagine 21–42 del volume completo · estratto per lo studio

Un seme di fagiolo dimenticato in un cassetto sembra un sassolino: non si muove, non si nutre, non cresce. Eppure, se lo appoggi su un batuffolo di cotone bagnato, in pochi giorni si gonfia, spacca il suo rivestimento e allunga una radice verso il basso. Un sasso, nelle stesse condizioni, resta un sasso. Che cosa possiede il seme che il sasso non ha? Da questa domanda comincia la biologia. In questo capitolo vedremo quali caratteristiche accomunano tutti gli esseri viventi, come gli scienziati hanno dimostrato che la vita nasce soltanto da altra vita e con quali strumenti si osserva la cellula, l'unità di cui ogni vivente è fatto.

1.1 La biologia e le caratteristiche dei viventi

1.1.1 Una scienza sperimentale

La **biologia** (dal greco *bíos*, «vita», e *lógos*, «studio») è la scienza che studia gli esseri viventi: come sono fatti, come funzionano, da dove vengono e quali rapporti li legano fra loro e con l'ambiente. Come la chimica e le scienze della Terra di *Scienze naturali 1*, la biologia segue il metodo sperimentale: si osserva un fenomeno, si formula un'ipotesi che si possa controllare e la si mette alla prova con un esperimento controllato, nel quale si fa variare una sola variabile indipendente, si misura la variabile dipendente e si confronta il risultato con una prova di controllo.

Gli esseri viventi, però, sono variabili: due piantine nate da semi dello stesso baccello non crescono mai in modo identico. Per questo in biologia un esperimento si ripete su molti individui.

1.1.2 Che cosa distingue un essere vivente

Non esiste una definizione di vita, in una riga, che metta d'accordo tutti i biologi. Si preferisce elencare un insieme di caratteristiche che ogni essere vivente possiede *contemporaneamente*. Un oggetto non vivente può mostrarne qualcuna, mai tutte insieme.

1. **Organizzazione cellulare.** Ogni vivente è formato da una o più **cellule**, piccole unità delimitate da una membrana, che contengono il materiale ereditario e svolgono le funzioni vitali. Un batterio è una sola cellula; il corpo umano ne contiene decine di migliaia di miliardi.
2. **Metabolismo.** Il **metabolismo** è l'insieme delle trasformazioni chimiche che avvengono in un organismo. Un vivente scambia di continuo materia ed energia con l'ambiente: assume sostanze (cibo, acqua, gas), le trasforma per ricavarne energia e materiali da costruzione ed elimina gli scarti.

3. **Omeostasi.** L'**omeostasi** è la capacità di mantenere stabili le condizioni interne (temperatura, contenuto d'acqua, concentrazione delle sostanze) anche quando l'ambiente esterno cambia. La temperatura interna del tuo corpo resta vicina ai 37 °C d'inverno e d'estate: se tende a salire sudi, se tende a scendere rabbrividisci.
4. **Crescita e sviluppo.** I viventi crescono, aumentando il numero o le dimensioni delle loro cellule, e si sviluppano, cioè cambiano forma e funzioni nel corso della vita secondo le istruzioni del loro materiale ereditario: un girino diventa una rana, un seme una pianta.
5. **Risposta agli stimoli.** I viventi percepiscono i cambiamenti dell'ambiente (luce, temperatura, sostanze chimiche, contatto) e reagiscono: una pianta sul davanzale piega il fusto verso la finestra, un'alga unicellulare come l'euglena nuota verso la luce, la tua mano si ritrae da una pentola che scotta.
6. **Riproduzione ed ereditarietà.** I viventi generano nuovi individui e trasmettono loro le informazioni per costruirsi e funzionare. L'**ereditarietà** è questa trasmissione dei caratteri dai genitori ai figli; l'informazione ereditaria è contenuta nel DNA (Capitolo 2).
7. **Adattamento ed evoluzione.** Gli organismi possiedono caratteristiche, gli **adattamenti**, che li rendono adatti all'ambiente in cui vivono: le spine del cactus, che riducono la perdita d'acqua, o la pelliccia folta dell'orso polare. Gli adattamenti sono il risultato dell'**evoluzione**, il cambiamento delle caratteristiche delle popolazioni nel corso di molte generazioni (Capitolo 9).

> **ERRORE FREQUENTE**
> «La giraffa ha il collo lungo perché ne aveva bisogno.» Un adattamento non compare perché un individuo ne ha bisogno, né un cambiamento acquisito durante la vita si trasmette ai figli. A cambiare nel tempo sono le **popolazioni**: fra le variazioni che compaiono per caso, quelle utili in un certo ambiente vengono trasmesse più spesso alle generazioni successive. Ne parleremo a lungo nel Capitolo 9.

1.1.3 Casi limite: cristalli, fuoco, virus

L'elenco serve soprattutto a ragionare sui casi dubbi. Un **cristallo** di sale, in una soluzione satura, cresce; e se un frammento cade in un'altra soluzione dà origine a un nuovo cristallo. Ma un cristallo cresce solo perché nuove particelle si aggiungono dall'esterno alla sua superficie: non ha metabolismo, non mantiene condizioni interne diverse da quelle dell'ambiente, non è fatto di cellule.

Il **fuoco** sembra ancora più «vivo»: consuma combustibile e ossigeno, libera energia e prodotti di scarto, si propaga e accende nuovi focolai. Una fiamma, però, non ha cellule, non regola nulla al proprio interno e non possiede un materiale ereditario da trasmettere: ogni incendio è un fenomeno chimico che dura finché trova combustibile e ossigeno.

Il caso più discusso è quello dei **virus**. Un virus è formato da materiale ereditario racchiuso in un rivestimento di proteine; è molto più piccolo di una cellula e non ha un metabolismo proprio. Fuori da una cellula è una particella inerte; dentro una cellula ne sfrutta le strutture per produrre nuove copie di sé. I virus hanno dunque ereditarietà ed evoluzione, ma non organizzazione cellulare né metabolismo autonomo: per questo molti biologi li collocano al confine fra vivente e non vivente. Li studierai nel Capitolo 12.

1.2 I livelli di organizzazione

I viventi si possono studiare a scale molto diverse, dalla singola molecola all'intero pianeta. I biologi ordinano queste scale in **livelli di organizzazione**: ogni livello è formato da unità del livello precedente, come mostra la Figura 1.1 con l'esempio di un albero.

- Le **molecole**, come l'acqua, le proteine o il DNA, sono i materiali della vita (Capitolo 2).
- Gli **organuli** sono strutture interne della cellula con una funzione precisa: il nucleo custodisce il DNA, il cloroplasto svolge la fotosintesi.
- La **cellula** è il livello più semplice che possiede tutte le caratteristiche della vita.
- Un **tessuto** è un insieme di cellule simili che svolgono la stessa funzione: il tessuto muscolare, l'epidermide di una foglia.
- Un **organo** è formato da tessuti diversi che lavorano insieme: la foglia, la radice, il cuore, lo stomaco.
- Un **apparato** (o sistema) è un insieme di organi che collaborano a una funzione: l'apparato digerente; nelle piante, il germoglio (fusto e foglie) e l'apparato radicale.
- L'**organismo** è il singolo individuo vivente: un faggio, un lombrico, un batterio.
- Una **popolazione** è l'insieme degli individui della stessa specie che vivono nella stessa area nello stesso periodo: i faggi di un bosco.
- Una **comunità** è l'insieme delle popolazioni di specie diverse che vivono nella stessa area: faggi, abeti, funghi, uccelli, insetti, batteri del suolo.
- Un **ecosistema** è formato da una comunità e dall'ambiente fisico in cui vive: suolo, acqua, aria, luce, temperatura.
- La **biosfera** è l'insieme di tutti gli ecosistemi della Terra: un involucro sottile che comprende le acque, il suolo e la parte più bassa dell'atmosfera.

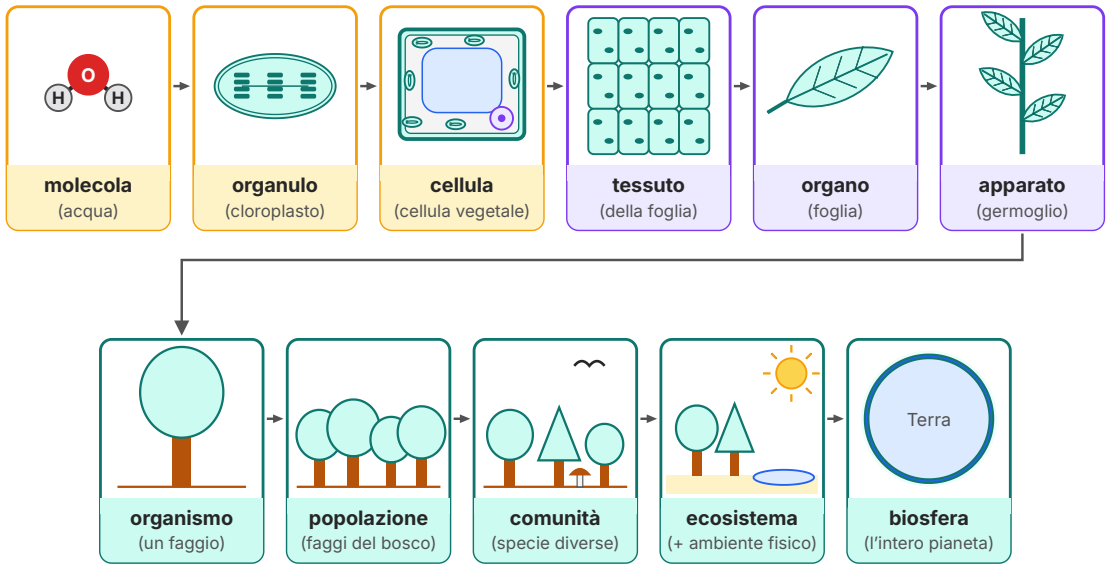


Figura 1.1 I livelli di organizzazione dei viventi, con l'esempio di una pianta. Ogni livello è formato da unità del livello precedente; la cellula è il primo livello vivo. Schema non in scala.

In un organismo unicellulare, come un batterio o un'ameba, la cellula *è* l'organismo: i livelli del tessuto, dell'organo e dell'apparato mancano.

Salendo da un livello al successivo compaiono proprietà che il livello inferiore non ha: le **proprietà emergenti**. Una singola cellula muscolare del cuore si contrae, ma soltanto il cuore intero pompa il sangue; un albero da solo non è un bosco, con il suo sottobosco, la sua ombra e il suo clima più fresco. Nessuna molecola, presa da sola, è viva: la vita stessa è una proprietà emergente, che compare al livello della cellula.

DA RICORDARE

Molecole e organuli non sono vivi da soli. La **cellula** è la più piccola unità che possiede tutte le caratteristiche della vita: ogni livello superiore, dal tessuto alla biosfera, è costruito con cellule e con i loro prodotti.

1.3 La vita nasce dalla vita

Fino al Seicento quasi tutti erano convinti che alcuni viventi potessero formarsi direttamente dalla materia non vivente: i vermi dal fango, le mosche dalla carne in decomposizione, perfino i topi da stracci e grano lasciati in un angolo. Questa idea, la **generazione spontanea**, risaliva

ad Aristotele e sembrava confermata dall'esperienza di tutti i giorni. Per smentirla occorsero due secoli e tre serie di esperimenti che ancora oggi sono modelli di esperimento controllato.

1.3.1 Redi e le mosche

Il medico e naturalista aretino Francesco Redi, che lavorava a Firenze alla corte dei Medici, pubblicò nel 1668 le *Esperienze intorno alla generazione degl'insetti*. Redi aveva notato che sulla carne in decomposizione, prima che comparissero i «vermi» (in realtà larve di mosca), si posavano sempre delle mosche. La sua ipotesi era che le larve nascessero dalle uova deposte dalle mosche e non dalla carne.

Per controllarla mise pezzi di carne in alcuni vasi lasciati aperti e in altri chiusi con carta legata. Nei vasi aperti, visitati dalle mosche, comparvero le larve; in quelli chiusi no, benché la carne marcisse ugualmente. Qualcuno poteva obiettare che la chiusura impediva all'aria di entrare, e che proprio l'aria fosse necessaria alla nascita dei vermi. Redi ripeté allora la prova coprendo i vasi con un velo sottile, che lasciava passare l'aria ma non gli insetti: le mosche, attirate dall'odore, deponevano le uova sul velo, e sulla carne non nacque alcuna larva (Figura 1.2).



Figura 1.2 Lo schema degli esperimenti di Redi (1668). Le larve compaiono solo dove le mosche possono deporre le uova sulla carne; il velo lascia passare l'aria ma non gli insetti. Schema non in scala.

In termini moderni, la variabile indipendente era la possibilità per le mosche di raggiungere la carne; la variabile dipendente, la comparsa delle larve. Il vaso aperto faceva da controllo, mentre il tipo di carne, il luogo e la durata della prova erano uguali per tutti i vasi. Il velo elimina una spiegazione alternativa, quella dell'aria, senza cambiare nient'altro.

ERRORE FREQUENTE

«Redi dimostrò che la generazione spontanea non esiste.» Non proprio. Redi dimostrò che le larve di mosca nascono dalle uova delle mosche, cioè smentì la generazione spontanea per gli insetti. Pochi anni dopo il microscopio rivelò un mondo di esseri minuscoli che comparivano in pochi giorni in qualsiasi liquido nutritivo, e per loro la questione si riaprì. Per i microrganismi la prova decisiva arrivò solo con Pasteur, quasi due secoli più tardi.

1.3.2 Spallanzani e i brodi sigillati

A metà del Settecento l'inglese John Needham fece bollire per pochi minuti dei brodi di carne in recipienti tappati e, dopo qualche giorno, li trovò pieni di microrganismi: ne concluse che questi nascevano spontaneamente. Negli anni 1760 Lazzaro Spallanzani (1729–1799), sacerdote e naturalista emiliano, ripeté le prove con più rigore. Fece bollire i brodi molto più a lungo e chiuse alcuni recipienti fondendone il collo di vetro alla fiamma, lasciandone altri aperti. I brodi sigillati restavano limpidi; quelli aperti si intorbidavano e brulicavano di microrganismi.

Needham obiettò che la lunga bollitura e la chiusura ermetica distruggevano o escludevano una «forza vitale» presente nel brodo e nell'aria: finché l'aria restava esclusa, l'obiezione non si poteva smontare.

1.3.3 Pasteur e i palloni a collo di cigno

La risposta definitiva arrivò dal chimico francese Louis Pasteur (1822–1895), con esperimenti condotti fra il 1859 e il 1862. Pasteur versò un brodo nutritivo in palloni di vetro, ne allungò il collo scaldandolo alla fiamma e lo piegò a S, come il collo di un cigno; poi fece bollire il brodo. Il collo restava aperto, quindi l'aria poteva entrare liberamente; ma la polvere e i microrganismi sospesi nell'aria si depositavano nella curva del collo e non raggiungevano il liquido. Il brodo restava limpido per mesi. Se invece il collo veniva spezzato, oppure il pallone veniva inclinato in modo che il brodo bagnasse la curva, in pochi giorni il liquido si riempiva di microrganismi (Figura 1.3).

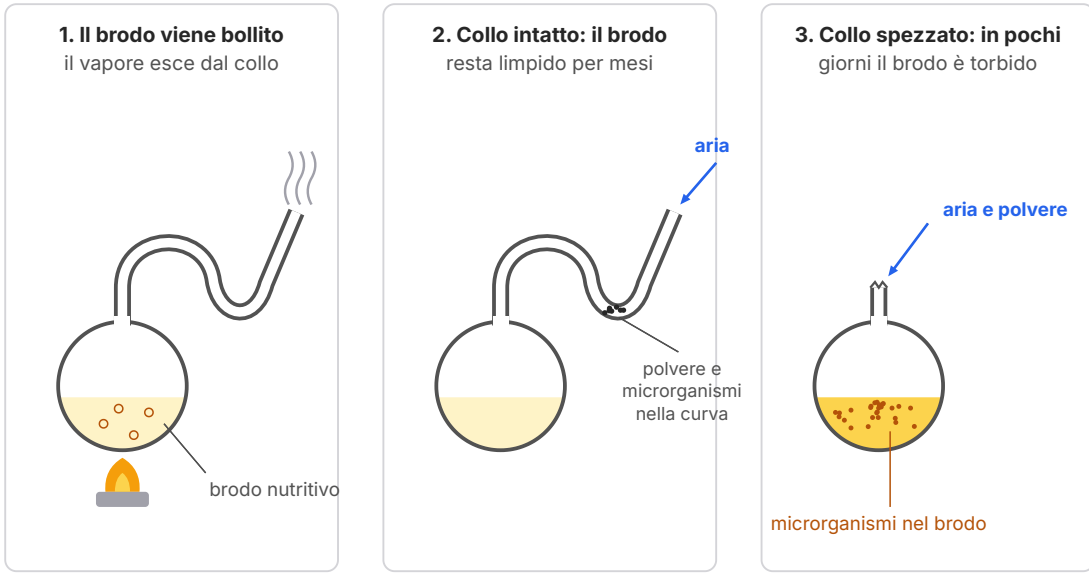


Figura 1.3 L'esperimento dei palloni a collo di cigno di Pasteur (1859–1862). L'aria raggiunge il brodo in tutti e due i casi; i microrganismi solo quando il collo è spezzato. Schema non in scala.

L'obiezione di Needham cadeva: l'aria arrivava al brodo, eppure non nasceva nulla. I microrganismi che intorbidano un liquido non si formano dal liquido: provengono da altri microrganismi, trasportati dall'aria e dalla polvere. Il principio che ne risulta, per cui ogni essere vivente deriva da un altro essere vivente, si chiama **biogenesi**. Attenzione: questi esperimenti dicono che nelle condizioni attuali la vita non si forma dal nulla; non dicono come sia comparsa la prima forma di vita sulla Terra, miliardi di anni fa e in un ambiente molto diverso. È una domanda diversa, ancora aperta, che affronteremo nel Capitolo 10.

COLLEGAMENTI

Pastorizzazione e sterilizzazione. Le ricerche di Pasteur hanno conseguenze che incontri ogni giorno. La **pastorizzazione**, ideata da Pasteur negli anni Sessanta dell'Ottocento per il vino, riscalda un alimento per poco tempo a una temperatura inferiore a quella di ebollizione: il latte fresco pastorizzato, per esempio, viene portato a circa 72 °C per una quindicina di secondi. Si eliminano quasi tutti i microrganismi pericolosi, ma non tutti: per questo il latte fresco va tenuto in frigorifero. La **sterilizzazione**, usata negli ospedali e nell'industria delle conserve, elimina invece ogni forma di vita, comprese le spore più resistenti, di solito con vapore a circa 120 °C sotto pressione.

1.4 Le dimensioni del mondo cellulare

1.4.1 Micrometri e nanometri

Per descrivere le cellule si usano due sottomultipli del metro che conosci da *Scienze naturali 1*: il **micrometro** (µm), un milionesimo di metro, e il **nanometro** (nm), un miliardesimo di metro.

$$1\ \text{mm} = 1000\ \mu\text{m} \qquad 1\ \mu\text{m} = 1000\ \text{nm} \qquad 1\ \text{mm} = 10^6\ \text{nm}$$

Un batterio come *Escherichia coli*, che vive nel nostro intestino, è lungo circa 2 µm; quasi tutti i batteri misurano fra 1 e 2 µm. Le cellule eucariotiche tipiche, come quelle delle piante e degli animali, misurano da 10 a 100 µm; un globulo rosso umano ha un diametro di circa 7–8 µm. I virus sono molto più piccoli: da circa 20 a 300 nm. Esistono anche cellule eccezionali: la cellula uovo umana, di circa 0,1 mm, è appena visibile a occhio nudo, e la cellula uovo della gallina, cioè il tuorlo, misura circa 3 cm, perché è riempita di sostanze di riserva per l'embrione.

Fra un atomo e un uovo di struzzo ci sono nove ordini di grandezza. Per rappresentarli in un solo disegno si usa una **scala logaritmica**, nella quale ogni tacca vale dieci volte la precedente (Figura 1.4): distanze uguali sul disegno corrispondono a moltiplicazioni per lo stesso fattore, non a somme.

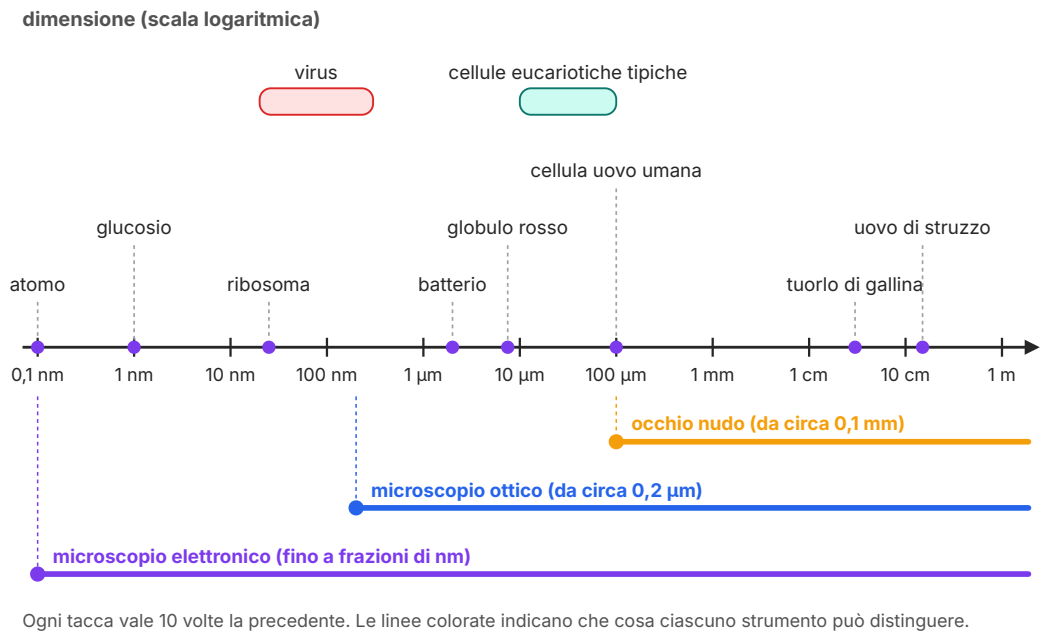


Figura 1.4 Le dimensioni del mondo vivente su scala logaritmica, dall'atomo all'uovo di struzzo, con i limiti di risoluzione dell'occhio e dei microscopi. Valori tipici: ogni gruppo comprende eccezioni.

1.4.2 Perché le cellule sono piccole

Se la cellula uovo della gallina può essere grande, perché quasi tutte le altre cellule sono microscopiche? La risposta sta nel rapporto fra superficie e volume. Tutto ciò che entra in una cellula e ne esce (ossigeno, nutrienti, scarti) deve attraversare la sua superficie, la membrana; il fabbisogno, invece, dipende dal volume, cioè dalla quantità di materiale vivo da rifornire. Il **rapporto superficie/volume** (S/V) misura quanta superficie di scambio è disponibile per ogni unità di volume. Quando una cellula cresce, il volume aumenta più in fretta della superficie e il rapporto S/V diminuisce.

ESEMPIO SVOLTO

Il rapporto S/V di tre cubi

Problema. Immagina tre cellule a forma di cubo, di lato $L = 1\ \mu m$, $2\ \mu m$ e $4\ \mu m$. Calcola per ciascuna superficie, volume e rapporto S/V.

Soluzione. Un cubo ha 6 facce quadrate, quindi $S = 6 \cdot L^2$; il volume è $V = L^3$.

Lato L	$S = 6 \cdot L^2$	$V = L^3$	S/V
$1\ \mu m$	$6\ \mu m^2$	$1\ \mu m^3$	$6\ \mu m^{-1}$
$2\ \mu m$	$24\ \mu m^2$	$8\ \mu m^3$	$3\ \mu m^{-1}$
$4\ \mu m$	$96\ \mu m^2$	$64\ \mu m^3$	$1{,}5\ \mu m^{-1}$

Commento. Quando il lato raddoppia, la superficie diventa 4 volte più grande ma il volume 8 volte: S/V si dimezza. Per un cubo $S/V = 6L^2/L^3 = 6/L$.

Il grafico della Figura 1.5 mostra come S/V cala all'aumentare del lato. Oltre una certa dimensione, gli scambi attraverso la membrana non basterebbero più a rifornire l'interno, e le sostanze impiegherebbero troppo tempo a raggiungere il centro della cellula. Le cellule grandi sono spesso appiattite o allungate, oppure hanno la superficie sollevata in tante minuscole sporgenze, come le cellule dell'intestino che assorbono il cibo. E un organismo grande, come un elefante o una quercia, non è fatto di cellule enormi, ma di un numero enorme di cellule piccole.

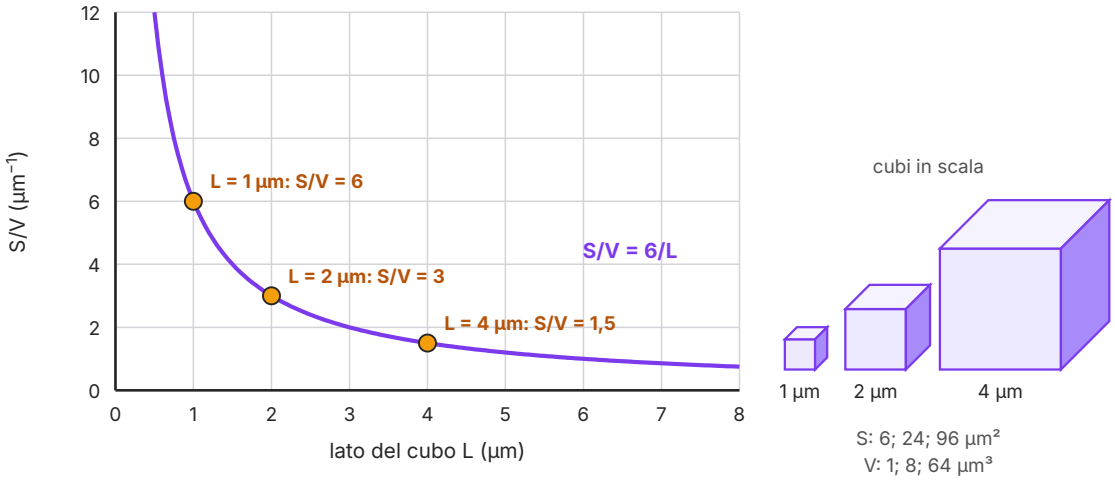


Figura 1.5 Rapporto superficie/volume di un cubo in funzione del lato, calcolato con S/V = 6/*L*. In evidenza i tre cubi dell'esempio svolto.

COLLEGAMENTI

S/V nella vita quotidiana. Il ghiaccio tritato fonde più in fretta di un unico grosso blocco della stessa massa, e le patate tagliate a cubetti cuociono prima di quelle intere: in entrambi i casi la superficie a contatto con l'ambiente è molto maggiore, a parità di volume. Lo stesso vale per il calore degli animali (*Scienze naturali 1*): un topo, con un alto rapporto S/V, disperde calore molto in fretta e deve mangiare ogni giorno molto cibo rispetto al proprio peso.

1.5 Il microscopio

1.5.1 Il microscopio ottico composto

Quasi tutte le cellule sono più piccole di 0,1 mm, il dettaglio più piccolo che l'occhio umano riesce a distinguere. Per osservarle serve un microscopio. Il **microscopio ottico composto** (MO) usa la luce visibile e due sistemi di lenti posti uno dopo l'altro: l'**obiettivo**, vicino al campione, forma un'immagine ingrandita, che l'**oculare**, vicino all'occhio, ingrandisce ancora. Le sue parti principali sono indicate nella Figura 1.6.

- L'**oculare** è la lente in cui si guarda; di solito ingrandisce 10 volte (10×).
- Il **revolver** è un disco girevole che porta 3 o 4 **obiettivi** di ingrandimento diverso, per esempio 4×, 10×, 40× e 100×; l'ultimo si usa con una goccia d'olio fra lente e vetrino (obiettivo a immersione).

- Il **tavolino** sostiene il vetrino, tenuto fermo da pinzette o da un carrello; al centro ha un foro da cui passa la luce.
- La **sorgente luminosa**, nella base, invia la luce dal basso verso il campione; il **condensatore** la concentra sul campione e il **diaframma** ne regola la quantità, e con essa il contrasto dell'immagine.
- La **vite macrometrica** sposta molto il tavolino (o il tubo) e serve per una prima messa a fuoco; la **vite micrometrica** lo sposta di pochissimo e serve per la messa a fuoco fine.
- Il **braccio** e la **base** formano lo stativo, la struttura che regge tutte le altre parti; il microscopio si trasporta tenendolo per il braccio e sostenendo la base.

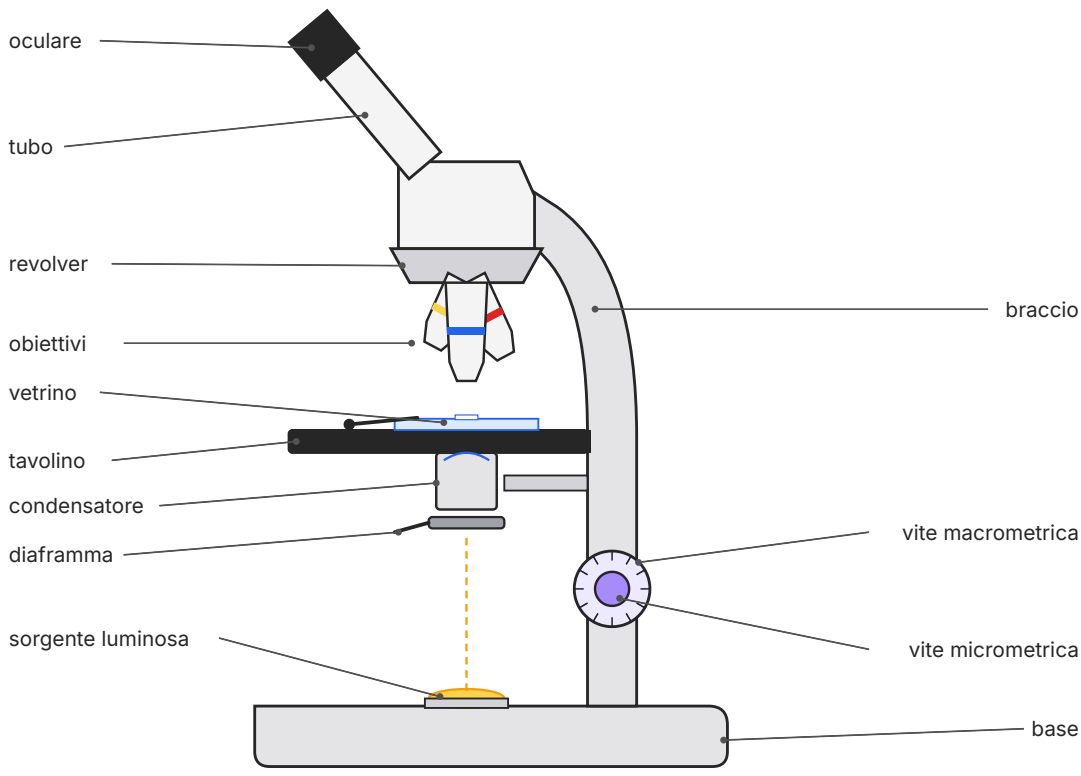


Figura 1.6 Il microscopio ottico composto e le sue parti. La luce parte dalla base, attraversa condensatore, vetrino, obiettivo e tubo e giunge all'oculare. Le due viti di messa a fuoco sono coassiali. Schema non in scala.

Si mette a fuoco sempre partendo dall'obiettivo più debole, che mostra un campo ampio; con gli obiettivi forti si usa solo la vite micrometrica, perché con la macrometrica l'obiettivo potrebbe urtare il vetrino e romperlo.

1.5.2 Ingrandimento e potere risolutivo

L'**ingrandimento** dice quante volte l'immagine è più grande dell'oggetto. In un microscopio composto l'ingrandimento totale è il prodotto degli ingrandimenti delle due lenti:

ingrandimento totale = ingrandimento dell'oculare × ingrandimento dell'obiettivo

Con un oculare 10× e un obiettivo 40×, per esempio, l'immagine è 10 × 40 = 400 volte più grande dell'oggetto. Ingrandire, però, non basta: un'immagine sfocata resta sfocata anche se la si allarga. Conta il **potere risolutivo**, cioè la distanza minima fra due punti che lo strumento mostra ancora separati: più è piccola, più dettagli si vedono. L'occhio umano distingue due punti distanti circa 0,1 mm; il microscopio ottico arriva a circa 0,2 µm, cioè circa 500 volte meglio. Questo limite non dipende dalla qualità delle lenti ma dalla natura della luce: con la luce visibile non si distinguono dettagli più piccoli di circa metà della sua lunghezza d'onda.

Nelle immagini dei libri e delle riviste scientifiche, accanto a una micrografia (una fotografia fatta al microscopio) compare spesso una **barra di scala**: un segmento con la sua lunghezza reale, per esempio «10 µm». Confrontando la barra con l'immagine si ricavano le dimensioni reali, qualunque sia la grandezza a cui la figura è stampata.

ESEMPIO SVOLTO

Dalla micrografia alle dimensioni reali

Problema 1. In una fotografia scattata al microscopio con ingrandimento 400×, una cellula di epidermide di cipolla misura 120 mm. Quanto è lunga in realtà?

Soluzione. dimensione reale = dimensione dell'immagine / ingrandimento = 120 mm / 400 = 0,3 mm = 300 µm. È una cellula vegetale piuttosto lunga, come sono di solito quelle dell'epidermide di cipolla.

Problema 2. In una micrografia la barra di scala, che indica 20 µm, è lunga 16 mm; un globulo bianco nella stessa immagine misura 9,6 mm. Quanto misura davvero? Qual è l'ingrandimento della figura?

Soluzione. Conviene usare la stessa unità: 16 mm = 16 000 µm. L'ingrandimento è 16 000 µm / 20 µm = 800×. La dimensione reale del globulo bianco è 9,6 mm / 800 = 0,012 mm = 12 µm. Si arriva allo stesso risultato con una proporzione: 20 µm : 16 mm = x : 9,6 mm, da cui x = 12 µm.

IN SINTESI

Ingrandimento totale = oculare × obiettivo · **dimensione reale** = dimensione dell'immagine / ingrandimento · **ingrandimento di una figura** = lunghezza misurata della barra di scala / lunghezza reale indicata. Prima di dividere, porta le due misure nella stessa unità.

ERRORE FREQUENTE

«Con un ingrandimento più grande si vede sempre di più.» No: oltre circa 1000–1500 volte, un microscopio ottico produce un'immagine più grande ma non più dettagliata (si parla di ingrandimento «vuoto»), perché il potere risolutivo resta fermo a circa 0,2 µm. Ingrandimento e risoluzione sono due grandezze diverse.

1.5.3 Preparare un vetrino

Il campione deve essere abbastanza sottile da lasciarsi attraversare dalla luce. Il preparato più semplice è il **vetrino a fresco**: si pone il campione in una goccia d'acqua al centro di un vetrino portaoggetti e lo si copre con un vetrino coprioggetti, appoggiandolo prima da un lato e abbassandolo lentamente per non intrappolare bolle d'aria.

Molte strutture cellulari sono trasparenti e quasi invisibili. Per renderle evidenti si usano i coloranti. Il **blu di metilene** colora di blu soprattutto il nucleo; la soluzione di **Lugol**, a base di iodio, dà alle cellule un colore giallo-bruno e colora di blu-nero l'amido (Capitolo 2). Spesso il campione viene prima *fissato*, cioè ucciso conservandone la forma; altri coloranti, detti vitali, si usano su cellule vive.

1.5.4 Microscopi elettronici e altri strumenti

Il **microscopio elettronico** (ME) sostituisce la luce con un fascio di elettroni e le lenti di vetro con lenti magnetiche. Gli elettroni si comportano come onde di lunghezza molto minore di quella della luce visibile, e la risoluzione migliora enormemente: nei migliori strumenti arriva a frazioni di nanometro. Ne esistono due tipi principali.

Nel **microscopio elettronico a trasmissione** (TEM) gli elettroni attraversano una sezione sottilissima del campione, spessa poche decine di nanometri: l'immagine mostra l'interno della cellula, con i suoi organuli e le sue membrane. Nel **microscopio elettronico a scansione** (SEM) il fascio percorre punto per punto la superficie del campione, ricoperta di un sottilissimo strato di metallo, e un computer ne ricostruisce un'immagine che appare tridimensionale. In entrambi i casi il campione deve stare nel vuoto, quindi non può essere vivo, e le immagini sono in bianco e nero: i colori delle micrografie elettroniche che vedi nei libri sono aggiunti al computer (falsi colori).

Altri strumenti completano il quadro. Lo **stereomicroscopio** ha due percorsi ottici, uno per occhio, e mostra in rilievo oggetti interi e anche vivi, come un insetto, un fiore o un seme, a ingrandimenti bassi, fino a qualche decina di volte. Il **microscopio a fluorescenza** illumina il campione con una luce di un certo colore e mostra soltanto le strutture marcate con sostanze fluorescenti, che brillano su fondo scuro. La Tabella 1.1 mette a confronto gli strumenti principali.

Tabella 1.1 Gli strumenti per osservare le cellule a confronto (risoluzioni indicative).

Strumento	Che cosa usa	Risoluzione migliore	Campione	Che cosa mostra
stereomicroscopio	luce riflessa dall'oggetto	inferiore a quella del MO	intero, anche vivo	superficie in rilievo, a basso ingrandimento
microscopio ottico (MO)	luce che attraversa il campione	≈ 0,2 µm	sottile, vivo o fissato	cellule e organuli più grandi, a colori
microscopio elettronico a trasmissione (TEM)	elettroni che attraversano il campione	frazioni di nm	sezione ultrasottile, non vivo	struttura interna, in bianco e nero
microscopio elettronico a scansione (SEM)	elettroni che percorrono la superficie	pochi nm	ricoperto di metallo, non vivo	superficie in rilievo, in bianco e nero

1.6 La teoria cellulare

1.6.1 Dalle celle del sughero agli «animaletti»

Nel 1665 l'inglese Robert Hooke (1635–1703), curatore degli esperimenti della Royal Society di Londra, pubblicò la *Micrographia*, un libro di osservazioni al microscopio illustrato da splendide tavole. Esaminando una fettina sottile di sughero, Hooke vide che era formata da tante piccole camere vuote, separate da pareti, che gli ricordavano le celle di un favo d'api; le chiamò *cells*, «celle». Quelle che Hooke vide erano in realtà le pareti di cellule vegetali morte: il contenuto vivo era scomparso da tempo.

Pochi anni dopo, negli anni 1670, l'olandese Antoni van Leeuwenhoek (1632–1723), un commerciante di tessuti di Delft, cominciò a inviare alla Royal Society lettere sorprendenti. Con microscopi che costruiva da sé, formati da una sola minuscola lente, osservò in una goccia d'acqua di stagno una folla di esseri unicellulari in movimento, che chiamò «animaletti»; descrisse poi i globuli rossi, gli spermatozoi e, più tardi, i batteri della placca dentale. Per la prima volta l'umanità vedeva cellule vive.

APPROFONDIMENTO

Approfondimento · Perché ci vollero quasi due secoli

Fra le «celle» di Hooke (1665) e la teoria cellulare (1838–1839) passarono più di 170 anni. Uno dei motivi era tecnico: i microscopi composti del Seicento e del Settecento davano immagini confuse, circondate da aloni colorati, perché le lenti di vetro deviano in modo diverso la luce di colori diversi (aberrazione cromatica). Solo intorno al 1830 gli obiettivi acromatici, che correggono questo difetto, resero il microscopio composto uno strumento affidabile. Nel 1831 il botanico scozzese Robert Brown descrisse il nucleo nelle cellule delle orchidee, e pochi anni dopo i naturalisti tedeschi poterono confrontare cellule di piante e di animali con strumenti finalmente adeguati.

1.6.2 Schleiden, Schwann e Virchow

Nel 1838 il botanico tedesco Matthias Schleiden concluse che tutte le parti delle piante sono formate da cellule. Nel 1839 il fisiologo Theodor Schwann estese la conclusione agli animali: anche i muscoli, i nervi, la cartilagine sono fatti di cellule o di materiali prodotti dalle cellule. Restava però un punto oscuro: da dove vengono le cellule nuove? Schleiden e Schwann pensavano che potessero formarsi dal liquido presente fra le cellule, quasi per cristallizzazione.

La risposta arrivò dall'osservazione di cellule in divisione, a cui contribuirono diversi studiosi, fra cui Robert Remak. Nel 1855 il medico tedesco Rudolf Virchow la riassunse in una formula latina divenuta celebre: *omnis cellula e cellula*, «ogni cellula deriva da una cellula». È la versione cellulare della biogenesi che Pasteur avrebbe dimostrato per i microrganismi pochi anni dopo.

La **teoria cellulare**, uno dei fondamenti della biologia, si riassume oggi in tre enunciati:

1. tutti gli esseri viventi sono formati da una o più cellule;
2. la cellula è l'unità fondamentale della struttura e delle funzioni dei viventi;
3. ogni cellula deriva da un'altra cellula preesistente.

È una *teoria* nel senso scientifico del termine: non un'ipotesi incerta, ma un quadro che spiega un'enorme quantità di osservazioni e che da quasi due secoli supera ogni controllo. Ne deriva, per esempio, che tutte le cellule di un organismo discendono, per divisioni successive, da una sola cellula iniziale (Capitolo 6).

ESPERIENZA DI LABORATORIO

Cellule vegetali e animali al microscopio

Obiettivo. Preparare due vetrini a fresco, osservare cellule dell'epidermide di cipolla e cellule della propria mucosa boccale e confrontarle.

Materiale. Microscopio ottico, vetrini porta- e coprioggetti, una cipolla, pinzette, contagocce, acqua, Lugol, blu di metilene diluito, bastoncini cotonati sterili, guanti, occhiali, un contenitore con disinfettante.

Procedimento. (1) Separa uno degli strati carnosi della cipolla (sono foglie modificate) e, con le pinzette, stacca dalla sua faccia interna il sottile velo trasparente (l'epidermide). (2) Stendilo senza pieghe in una goccia d'acqua sul vetrino, aggiungi una goccia di Lugol e copri con il coprioggetti appoggiandolo inclinato. (3) Con un bastoncino pulito strofina delicatamente l'interno della guancia e passa il bastoncino su un secondo vetrino; aggiungi una goccia di blu di metilene, attendi un minuto e copri. (4) Osserva ogni vetrino a 40×, poi a 100× e a 400×, usando con l'obiettivo 40× solo la vite micrometrica. Disegna ciò che vedi, con l'ingrandimento.

Sicurezza. Lugol e blu di metilene macchiano pelle e vestiti: usa guanti e occhiali. Ognuno usa soltanto il proprio bastoncino, che a fine prova va gettato nel contenitore con il disinfettante insieme ai vetrini della mucosa. Lavati le mani alla fine.

Risultato atteso. Le cellule di cipolla sono allungate, in file regolari come mattoni, con un contorno netto (la parete) e un nucleo giallo-bruno; non hanno cloroplasti. Le cellule della mucosa sono appiattite, irregolari, isolate o a piccoli gruppi, con un nucleo blu e un contorno sottile.

Domande. Quali differenze di forma e di contorno hai notato fra i due tipi di cellule? Perché le cellule di cipolla non sono verdi? Stima la lunghezza di una cellula di cipolla sapendo che il campo visivo a 100× ha un diametro di circa 1,8 mm.

SINTESI

- La **biologia** studia i viventi con il metodo sperimentale; poiché gli organismi sono variabili, gli esperimenti si ripetono su molti individui.
- Ogni vivente possiede insieme sette caratteristiche: **organizzazione cellulare, metabolismo, omeostasi, crescita e sviluppo, risposta agli stimoli, riproduzione ed ereditarietà, adattamento ed evoluzione**.
- Cristalli e fuoco ne mostrano solo alcune; i **virus** non sono cellule e non hanno metabolismo proprio, ma possiedono ereditarietà ed evoluzione.
- I **livelli di organizzazione** vanno dalla molecola alla biosfera; la cellula è il primo livello vivo; a ogni livello compaiono **proprietà emergenti**.
- **Redi** (1668) dimostrò con un esperimento controllato che le larve nascono dalle uova delle mosche; **Spallanzani** (anni 1760) che i brodi bolliti e sigillati restano sterili; **Pasteur** (1859–1862), con i palloni a collo di cigno, che anche i microrganismi derivano da altri microrganismi (**biogenesi**).
- 1 mm = 1000 µm; 1 µm = 1000 nm. Batteri 1–2 µm, cellule eucariotiche tipiche 10–100 µm, virus 20–300 nm circa.
- Le cellule sono piccole perché, crescendo, il **rapporto superficie/volume** diminuisce (per un cubo $S/V = 6/L$) e gli scambi con l'esterno diventano insufficienti.
- Nel **microscopio ottico composto** l'ingrandimento totale è il prodotto di oculare e obiettivo; il **potere risolutivo** arriva a circa 0,2 µm, contro 0,1 mm dell'occhio.
- Dimensione reale = dimensione dell'immagine / ingrandimento; la **barra di scala** permette di ricavare l'ingrandimento di una figura.
- I **microscopi elettronici** (TEM per l'interno delle cellule, SEM per le superfici) arrivano a risoluzioni di nanometri o meno, ma solo su campioni non vivi.
- La **teoria cellulare** (Schleiden 1838, Schwann 1839, Virchow 1855): tutti i viventi sono fatti di cellule; la cellula è l'unità di struttura e funzione; ogni cellula deriva da una cellula.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Quale di queste caratteristiche manca a un virus?
   - **A.** il materiale ereditario
   - **B.** un metabolismo proprio
   - **C.** un rivestimento di proteine
   - **D.** la capacità di evolvere

2. ● L'omeostasi è:
   A. la capacità di mantenere stabili le condizioni interne dell'organismo
   B. l'insieme delle trasformazioni chimiche di un organismo
   C. la produzione di nuovi individui
   D. la reazione di un organismo a uno stimolo luminoso

3. ● Quale sequenza di livelli di organizzazione è in ordine crescente?
   A. organo, tessuto, cellula, organismo
   B. cellula, organo, tessuto, apparato
   C. tessuto, cellula, organo, popolazione
   D. cellula, tessuto, organo, apparato

4. ● L'insieme delle popolazioni di specie diverse che vivono nella stessa area forma:
   A. un ecosistema
   B. un organismo
   C. una comunità
   D. la biosfera

5. ● Un micrometro corrisponde a:
   A. 1000 nm
   B. 100 nm
   C. 1000 mm
   D. 0,1 mm

6. ●● Nell'esperimento di Redi con il velo, la variabile indipendente è:
   A. il tipo di carne usato
   B. la temperatura della stanza
   C. la comparsa delle larve
   D. la possibilità per le mosche di raggiungere la carne

7. ●● Il potere risolutivo di un microscopio ottico è limitato soprattutto da:
   A. il numero di obiettivi montati sul revolver
   B. la natura della luce visibile
   C. la potenza della lampada
   D. la lunghezza del tubo

8. ●● Per osservare in rilievo la superficie di un granello di polline, con dettagli di pochi nanometri, useresti:
   A. il microscopio ottico composto
   B. lo stereomicroscopio
   C. il microscopio elettronico a scansione
   D. il microscopio a fluorescenza

9. ● Chi riassunse nel 1855 il principio *omnis cellula e cellula*?

   A. Robert Hooke
   B. Matthias Schleiden
   C. Louis Pasteur
   D. Rudolf Virchow

Vero o falso

10. ● Il fuoco è un essere vivente, perché consuma ossigeno, libera energia e si propaga.

11. ● In un organismo unicellulare la cellula coincide con l'organismo.

12. ● Le «celle» del sughero osservate da Hooke erano cellule vive.

13. ●● Gli esperimenti di Redi dimostrarono che neppure i microrganismi nascono per generazione spontanea.

14. ●● Se il lato di un cubo raddoppia, il suo rapporto superficie/volume si dimezza.

15. ●● I colori delle micrografie al microscopio elettronico sono i colori reali delle strutture cellulari.

Applicare

16. ● Un microscopio ha un oculare 10× e tre obiettivi: 4×, 10× e 40×. Quali ingrandimenti totali si possono ottenere?

17. ● Esegui le equivalenze: 0,025 mm = … µm; 7 µm = … nm; 450 nm = … µm.

18. ●● In una fotografia scattata con ingrandimento 400×, un paramecio è lungo 80 mm. Qual è la sua lunghezza reale, in µm?

19. ●● In una micrografia la barra di scala che indica 10 µm misura 25 mm, e una cellula misura 60 mm. Calcola l'ingrandimento della figura e la dimensione reale della cellula.

20. ●● Calcola superficie, volume e rapporto S/V di una cellula cubica di lato 3 µm e di una di lato 6 µm. Di quante volte è cambiato il rapporto?

21. ●● Ordina dal più piccolo al più grande: globulo rosso (7,5 µm), virus dell'influenza (circa 100 nm), *E. coli* (2 µm), cellula uovo umana (0,1 mm), ribosoma (25 nm). Quante volte la cellula uovo è più lunga del batterio?

22. ●●● Una cellula sferica ha superficie $S = 4\pi r^2$ e volume $V = \frac{4}{3}\pi r^3$. Calcola S/V per $r = 5$ µm e per $r = 10$ µm e mostra che, anche per la sfera, $S/V = 3/r$.

23. ●●● Per ciascuna coppia di oggetti indica lo strumento più semplice che li mostra separati, fra occhio nudo, microscopio ottico e microscopio elettronico: (a) due cellule di cipolla adiacenti, i cui nuclei distano 150 µm; (b) due mitocondri distanti 0,5 µm; (c) due ribosomi distanti 40 nm. Perché un microscopio ottico con ingrandimento 2000× non risolverebbe il caso (c)?

Leggere dati e figure

24. ●● Osserva il grafico della Figura 1.5. Di quante volte diminuisce S/V passando da un cubo di 1 µm a uno di 4 µm? Perché la curva si avvicina sempre di più all'asse orizzontale senza mai toccarlo?

25. ●● Una classe ripete l'esperimento di Pasteur con tre palloni di brodo. Pallone A: collo a cigno intatto, brodo bollito; limpido dopo 30 giorni. Pallone B: collo a cigno spezzato subito dopo la bollitura; torbido al terzo giorno. Pallone C: collo a cigno intatto, brodo *non* bollito; torbido al secondo giorno. Spiega il risultato di ciascun pallone e indica quale confronto mostra che l'aria da sola non basta a far comparire microrganismi.

26. ●●● Usa la scala della Figura 1.4. Quanti ordini di grandezza separano un atomo (0,1 nm) da una cellula eucariotica di 10 µm? Quali oggetti del disegno restano al di sotto del limite di risoluzione del microscopio ottico?

Indagare e argomentare

27. ●● Un cristallo di sale che si forma in una soluzione satura cresce e, se un frammento cade in un'altra soluzione, ne genera uno nuovo. Spiega perché non è un essere vivente, usando almeno tre delle caratteristiche dei viventi.

28. ●●● Un compagno sostiene che la muffa che compare sul pane «nasce dal pane». Progetta un esperimento controllato per mettere alla prova la sua ipotesi: indica la variabile indipendente, la variabile dipendente, le variabili da tenere costanti e la prova di controllo, e descrivi quali risultati smentirebbero la sua idea.

29. ●●● Perché un elefante non è formato da cellule enormi? Rispondi usando il rapporto superficie/volume e spiega quale vantaggio offre a un grande organismo l'essere formato da moltissime cellule piccole.

PER APPROFONDIRE

- [HOO] Le tavole della *Micrographia*, oggi consultabili in edizioni digitali: in particolare l'osservazione del sughero.
- [CAM] Il capitolo introduttivo sui temi della biologia e quello sulla cellula, con le tecniche di microscopia.
- [ALB] Il primo capitolo, sulle cellule e su come le si osserva.

Glossario del capitolo

Adattamento
Caratteristica che rende un organismo adatto all'ambiente in cui vive; è il risultato dell'evoluzione.

Biogenesi
Principio per cui ogni essere vivente deriva da un altro essere vivente.

Biosfera
L'insieme di tutti gli ecosistemi della Terra.

Comunità
Insieme delle popolazioni di specie diverse che vivono nella stessa area.

Ecosistema
Una comunità insieme all'ambiente fisico in cui vive.

Generazione spontanea
Antica ipotesi, smentita, secondo cui alcuni viventi si formerebbero dalla materia non vivente.

Ingrandimento
Rapporto fra la dimensione dell'immagine e quella reale dell'oggetto; nel MO è il prodotto di oculare e obiettivo.

Metabolismo
L'insieme delle trasformazioni chimiche che avvengono in un organismo.

Micrometro (µm)
Un milionesimo di metro; 1 mm = 1000 µm.

Nanometro (nm)
Un miliardesimo di metro; 1 µm = 1000 nm.

Omeostasi
Capacità di un organismo di mantenere stabili le condizioni interne al variare dell'ambiente.

Organulo
Struttura interna della cellula con una funzione specifica.

Popolazione
Insieme degli individui della stessa specie che vivono nella stessa area nello stesso periodo.

Potere risolutivo
Distanza minima fra due punti che uno strumento mostra ancora separati: ≈ 0,1 mm per l'occhio, ≈ 0,2 µm per il microscopio ottico.

Proprietà emergente
Proprietà che compare a un livello di organizzazione e manca nelle sue parti prese singolarmente.

Rapporto superficie/volume
Superficie di scambio disponibile per unità di volume; diminuisce quando un oggetto ingrandisce.

Teoria cellulare
Tutti i viventi sono fatti di cellule; la cellula è l'unità di struttura e funzione; ogni cellula deriva da una cellula.

Tessuto
Insieme di cellule simili che svolgono la stessa funzione.

Soluzioni

1. B. Un virus non ha metabolismo proprio: usa quello della cellula che infetta.

2. A.

3. D. Cellula → tessuto → organo → apparato.

4. C. Una comunità; con l'ambiente fisico formerebbe un ecosistema.

5. A. 1 µm = 10^{-6} m = 1000 nm.

6. D. È il fattore che Redi faceva variare; la comparsa delle larve è la variabile dipendente.

7. B. Con la luce visibile non si distinguono dettagli più piccoli di circa 0,2 µm, qualunque siano le lenti.

8. C. Il SEM mostra superfici in rilievo con risoluzione di pochi nanometri.

9. D.

10. F. Il fuoco non ha cellule, né omeostasi, né materiale ereditario: è un fenomeno chimico.

11. V.

12. F. Erano pareti di cellule morte; il contenuto vivo era scomparso.

13. F. Redi smentì la generazione spontanea solo per gli insetti; per i microrganismi la prova venne da Pasteur.

14. V. La superficie diventa 4 volte, il volume 8 volte: S/V = 6/*L* si dimezza.

15. F. Le immagini del ME sono in bianco e nero; i colori sono aggiunti al computer (falsi colori).

16. 10 × 4 = 40×; 10 × 10 = 100×; 10 × 40 = 400×.

17. 0,025 mm = 25 µm; 7 µm = 7000 nm; 450 nm = 0,45 µm.

18. 80 mm / 400 = 0,2 mm = 200 µm.

19. 25 mm = 25 000 µm; ingrandimento = 25 000 / 10 = 2500×. Dimensione reale = 60 mm / 2500 = 0,024 mm = 24 µm.

20. L = 3 µm: S = 54 µm^2, V = 27 µm^3, S/V = 2 µm^{-1}. L = 6 µm: S = 216 µm^2, V = 216 µm^3, S/V = 1 µm^{-1}. Il rapporto si è dimezzato.

21. Ribosoma (25 nm) < virus dell'influenza (100 nm) < *E. coli* (2 µm) < globulo rosso (7,5 µm) < cellula uovo (100 µm). 100 µm / 2 µm = 50 volte.

22. $S/V = 4\pi r^2 / (\frac{4}{3}\pi r^3) = 3/r$. Per r = 5 µm: $S \approx 314$ µm^2, $V \approx 524$ µm^3, S/V = 0,6 µm^{-1}. Per r = 10 µm: $S \approx 1257$ µm^2, $V \approx 4189$ µm^3, S/V = 0,3 µm^{-1}.

23. (a) Occhio nudo: 150 µm = 0,15 mm è più di 0,1 mm (al limite; con una lente o il MO si vede meglio). (b) Microscopio ottico: 0,5 µm è più di 0,2 µm. (c) Microscopio elettronico: 40 nm = 0,04 µm è sotto il limite del MO. Aumentare l'ingrandimento non serve: il potere risolutivo del MO resta circa 0,2 µm, e l'immagine diventerebbe solo più grande, non più dettagliata.

24. Da 6 µm^{-1} a 1,5 µm^{-1}: diminuisce di 4 volte. S/V = 6/*L* diventa sempre più piccolo al crescere di *L*, ma non si annulla mai, perché una superficie c'è sempre.

25. A: la bollitura ha ucciso i microrganismi del brodo e la curva trattiene quelli dell'aria; resta limpido. B: senza curva la polvere con i microrganismi cade nel brodo; si intorbida. C: il brodo non bollito contiene già microrganismi vivi, che si moltiplicano. Il confronto fra A e B mostra che l'aria raggiunge il brodo in entrambi i casi, ma i microrganismi compaiono solo quando possono entrare con la polvere.

26. 10 µm = 10^{-5} m e 0,1 nm = 10^{-10} m: 5 ordini di grandezza (100 000 volte). Sotto 0,2 µm restano l'atomo, la molecola di glucosio, il ribosoma e i virus (quasi tutti).

27. Traccia: il cristallo cresce per aggiunta di particelle dall'esterno, non per trasformazioni chimiche interne (non ha metabolismo); non mantiene condi-

zioni interne diverse dall'ambiente (non ha omeostasi); non è fatto di cellule; non trasmette informazione ereditaria né si evolve; non risponde agli stimoli.

28. Traccia: si preparano fette di pane uguali; variabile indipendente: il contatto del pane con l'aria o la polvere dell'ambiente (per esempio, alcune fette esposte all'aria per un'ora e poi chiuse in sacchetti, altre messe subito in sacchetti dopo essere state scaldate in forno per eliminare le spore presenti). Variabile dipendente: comparsa della muffa (giorni, superficie coperta). Costanti: tipo di pane, umidità, temperatura, durata. Controllo: fette esposte normalmente all'aria. Se la muffa compare solo sulle fette entrate in contatto con l'aria e non su quelle protette, l'idea che nasca dal pane è smentita: le spore arrivano dall'ambiente. Ripetere la prova con più fette.

29. Traccia: una cellula enorme avrebbe un rapporto S/V piccolissimo: la membrana non basterebbe a far entrare nutrienti e ossigeno e a far uscire gli scarti, e le sostanze impiegherebbero troppo tempo a raggiungere il centro. Molte cellule piccole hanno nel complesso una superficie di scambio enorme; inoltre possono specializzarsi in tessuti e organi diversi, e una cellula danneggiata può essere sostituita senza perdere l'intero organismo.