



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO



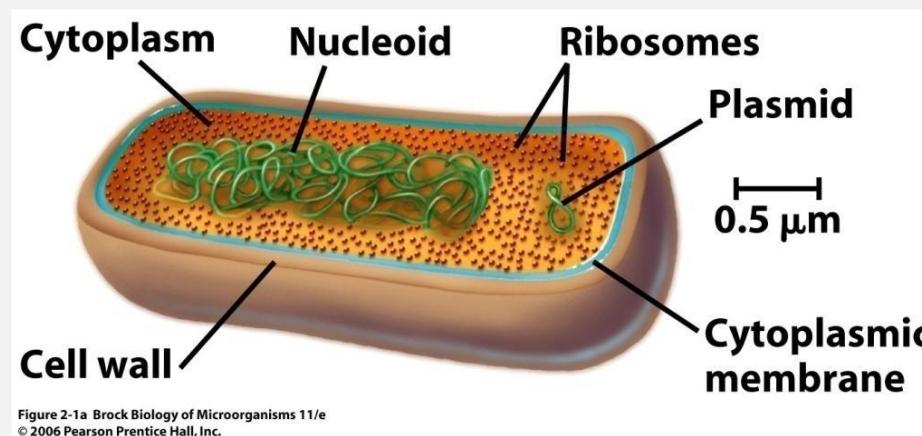
# I PROCARIOTI

Prof. Elisabetta Onelli

# Procarioti

I procarioti sono gli organismi più abbondanti sul nostro pianeta e si trovano in tutti gli ambienti acquatici e terrestri, anche più estremi ed inusuali come gli ambienti privi di ossigeno, le sorgenti termali calde, gli ambienti con pH molto acido o alcalino

Tutti i procarioti sono caratterizzati da un'organizzazione cellulare che li distingue nettamente dagli organismi eucarioti



**Assenza di nucleo e di compartmentazione interna**

# La protocellula

Sono cellule con dimensioni minori rispetto alle cellule eucariotiche e con forme variabili.

La forma delle singole cellule e delle colonie che queste possono formare sono alla base della classificazione:



1- cocci



2- bacilli



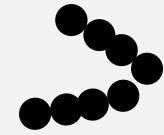
3- vibri



4- spirilli



5- diplococci



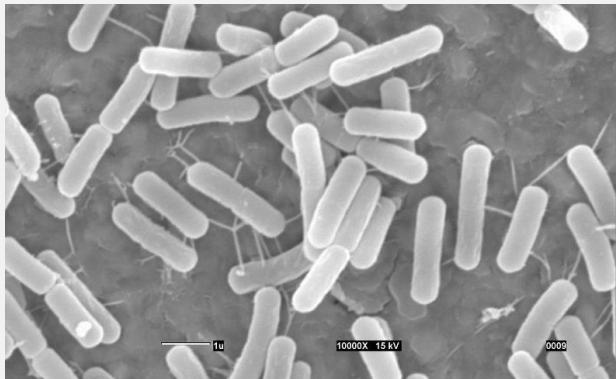
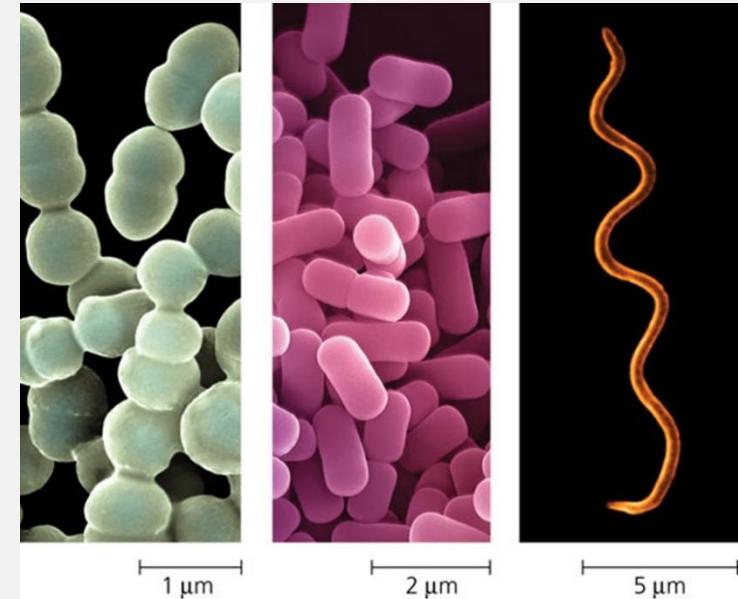
6- streptococci



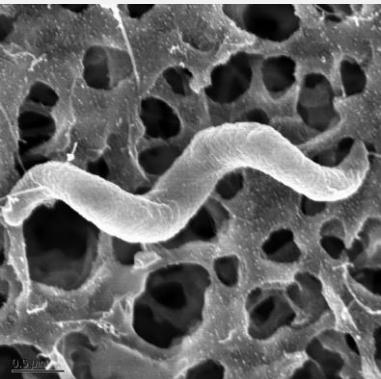
7- stafilococci



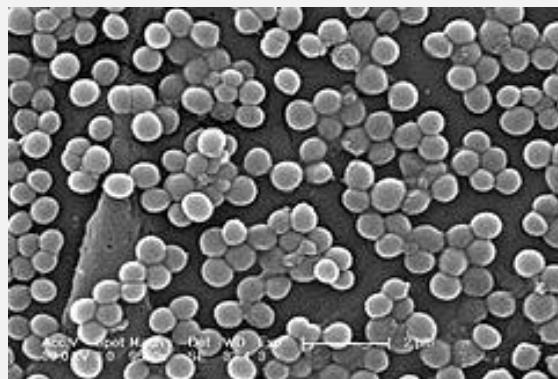
8- sarcine



Bacillus



Spirillum



Coccus

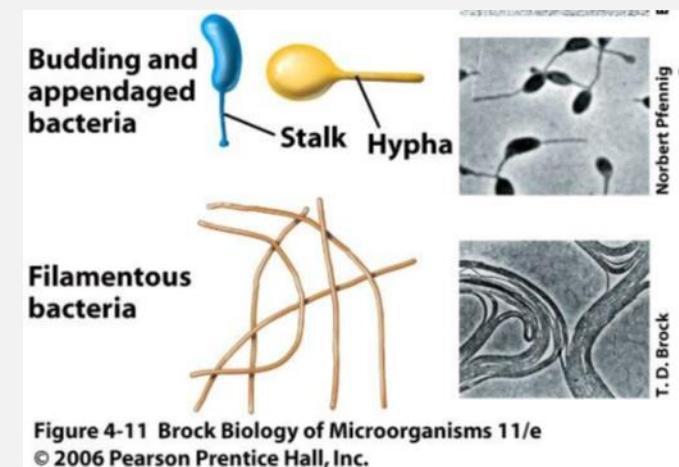
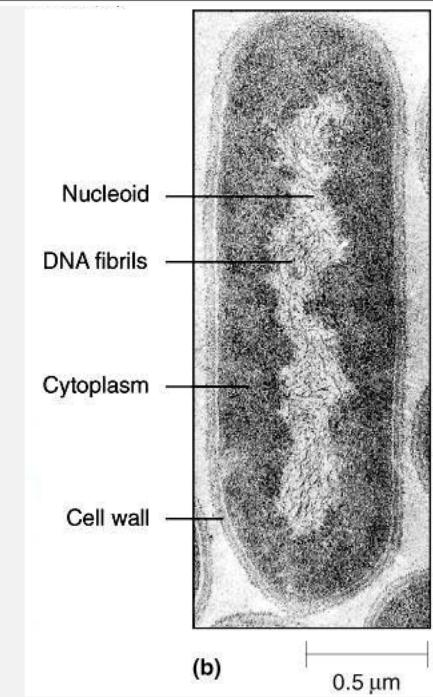
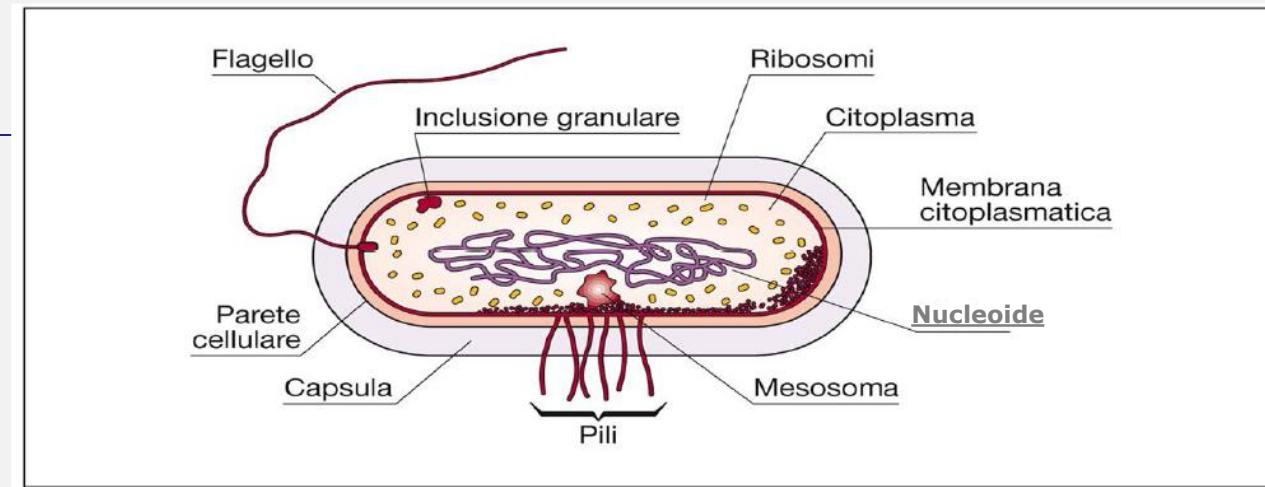


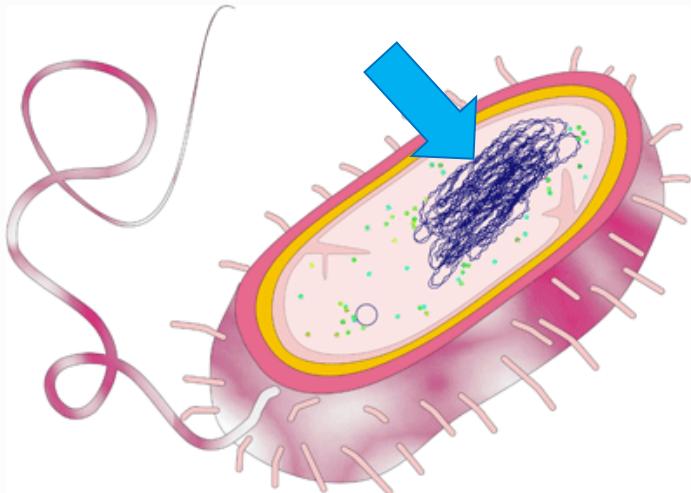
Figure 4-11 Brock Biology of Microorganisms 11/e  
© 2006 Pearson Prentice Hall, Inc.



## LA PROTOCELLULA

- Non contengono organelli
- sono privi di nucleo
- I ribosomi sono più piccoli (70S) di quelli della cellula eucariota
- Il genoma cellulare è più semplice di quello delle cellule eucariotiche
- Possono essere presenti granuli costituiti da sostanze di riserva (glicogeno, poli- $\beta$ -idrossibutirrato)
- La membrana cellulare dei procarioti è sempre circondata da una parete cellulare. La parete cellulare è composta da una sostanza caratteristica denominata peptidoglicano.
- Esternamente alla parete cellulare ci può essere uno strato più spesso e meno rigido, detto **capsula o glicocalice**.
- Dalla cellula possono sporgere strutture di movimento come **pili o flagelli**.



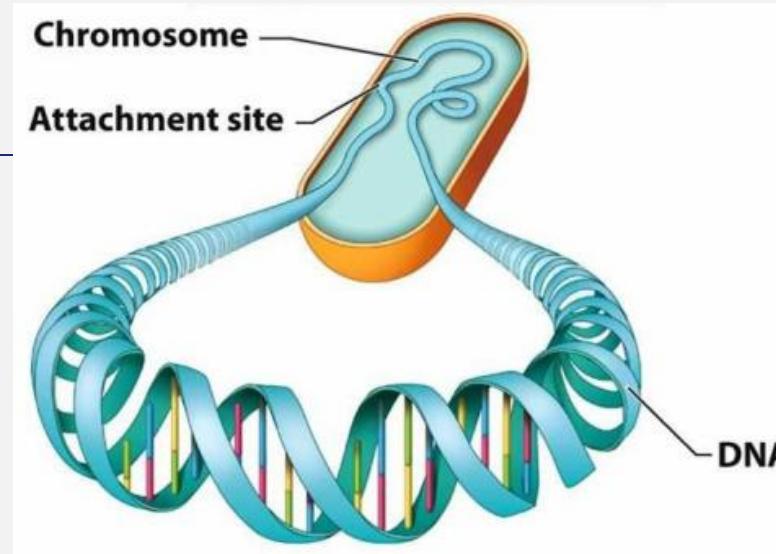


**Procarioti.** Rappresentazione schematica di un batterio flagellato. E' evidente la monocompartimentazione, col DNA circolare disposto nella zona detta nucleoide e la parete cellulare.

**E' localizzato in una regione detta Nucleoide. E' assente l'involucro nucleare.**

**E' aploide;** consente una crescita più veloce; le mutazioni permettono un adattamento più veloce all'ambiente.

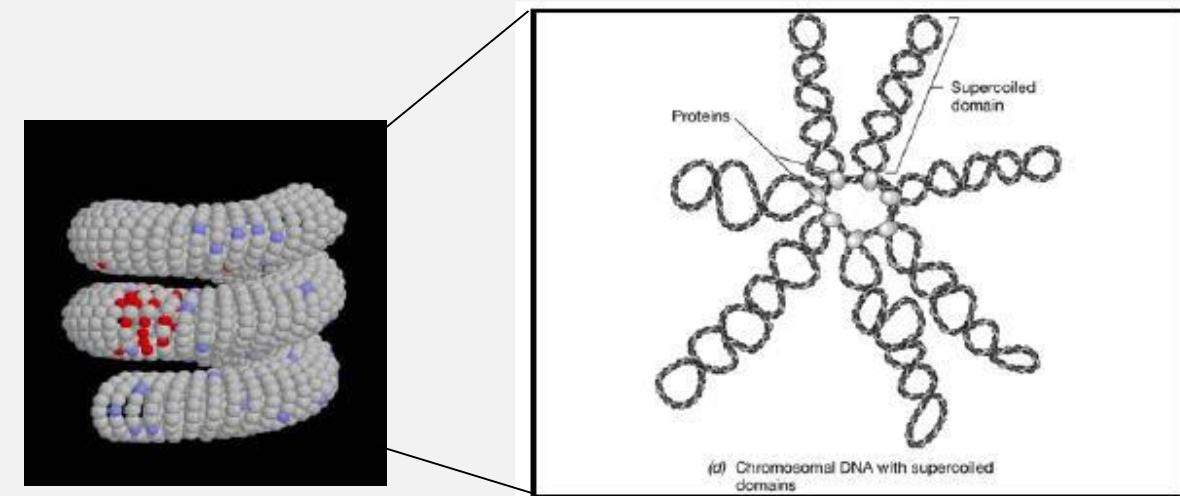
**il DNA è associato a proteine non istoniche.**



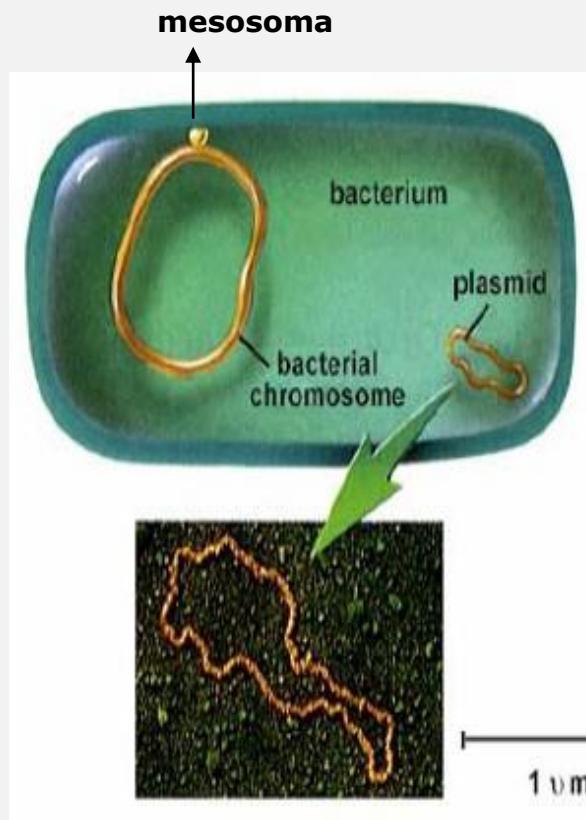
**In esso sono contenuti i geni per produrre le proteine necessarie al metabolismo del batterio.**

**Il cromosoma batterico è costituito da una molecola di DNA circolare a doppia elica** (con poche eccezione dove è lineare)

**In genere è unico** (fanno eccezione alcuni batteri dove si hanno 2 cromosomi circolari o *Agrobacterium* con 1 cromosoma circolare e 1 lineare)



(d) Chromosomal DNA with supercoiled domains



Oltre al cromosoma vi è molto spesso la presenza di una/più piccole molecole di DNA, sempre circolare(raramente lineare), che prendono il nome di **plasmidi**

Elementi genetici extra-cromosomici che possono essere in singola copia o multipli

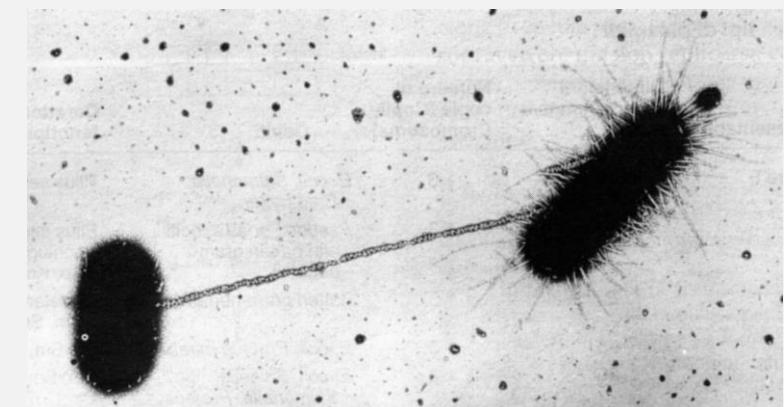
Sono costituiti da DNA per lo più circolare in grado di replicarsi in maniera autonoma dal cromosoma

Sono più piccoli del cromosoma

La loro informazione genetica non è essenziale per la cellula ospite ma può conferire un vantaggio selettivo in particolari condizioni

Hanno la capacità di trasferirsi da una cellula batterica all'altra attraverso un meccanismo di scambio genico che avviene con la formazione di pili specializzati

- Possibilità di RAPIDA DIFFUSIONE in una popolazione batterica
- Trasferimento di materiale genetico tra specie anche molto diverse
- Ruolo molto importante nella disseminazione di determinanti genetici di resistenza e virulenza

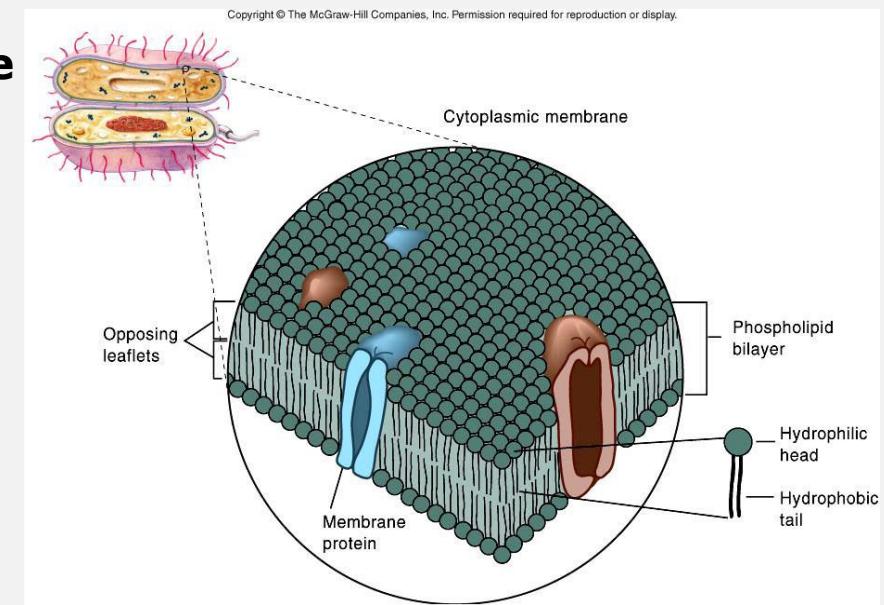
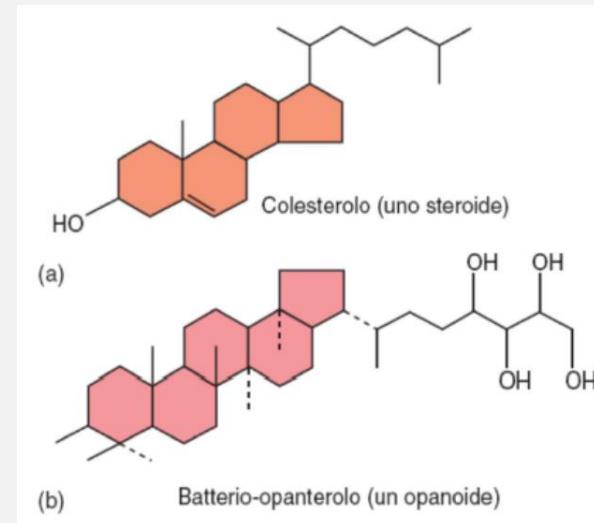


# MEMBRANA PLASMATICA

**Simile per struttura e funzioni alla membrana delle cellule eucariotiche ma con alcune distinzioni:**

Rispetto alla membrana eucariotica, quella procariotica:

- non contiene steroli (es. colesterolo), presenti solo nei micoplasmi e nei batteri metanotrofi; sostituiti da **opanoidi** aventi stessa funzione di stabilizzazione e compattamento
- è più ricca in proteine
- proteine non glicosilate



**Sede di funzioni che, nella cellula eucariotica, sono caratteristiche delle endomembrane (alloggiamento per sistemi enzimatici).**

# Fosfolipidi

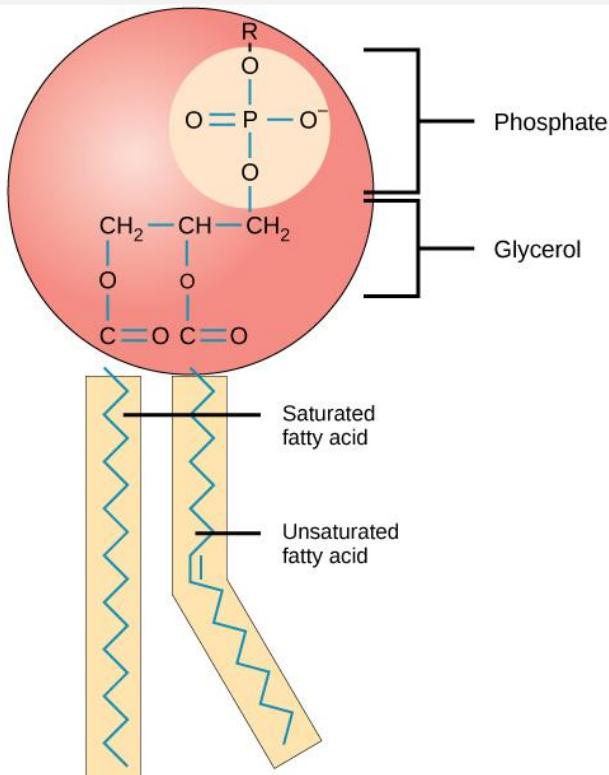
Classe di lipidi in cui in una molecola di glicerolo due gruppi OH sono esterificati con acidi grassi, mentre il terzo è esterificato con un gruppo fosfato.

Questo si lega ad una base azotata, che può essere un amminoalcool (es. etanolammina o colina) o un amminoacido (es. serina).

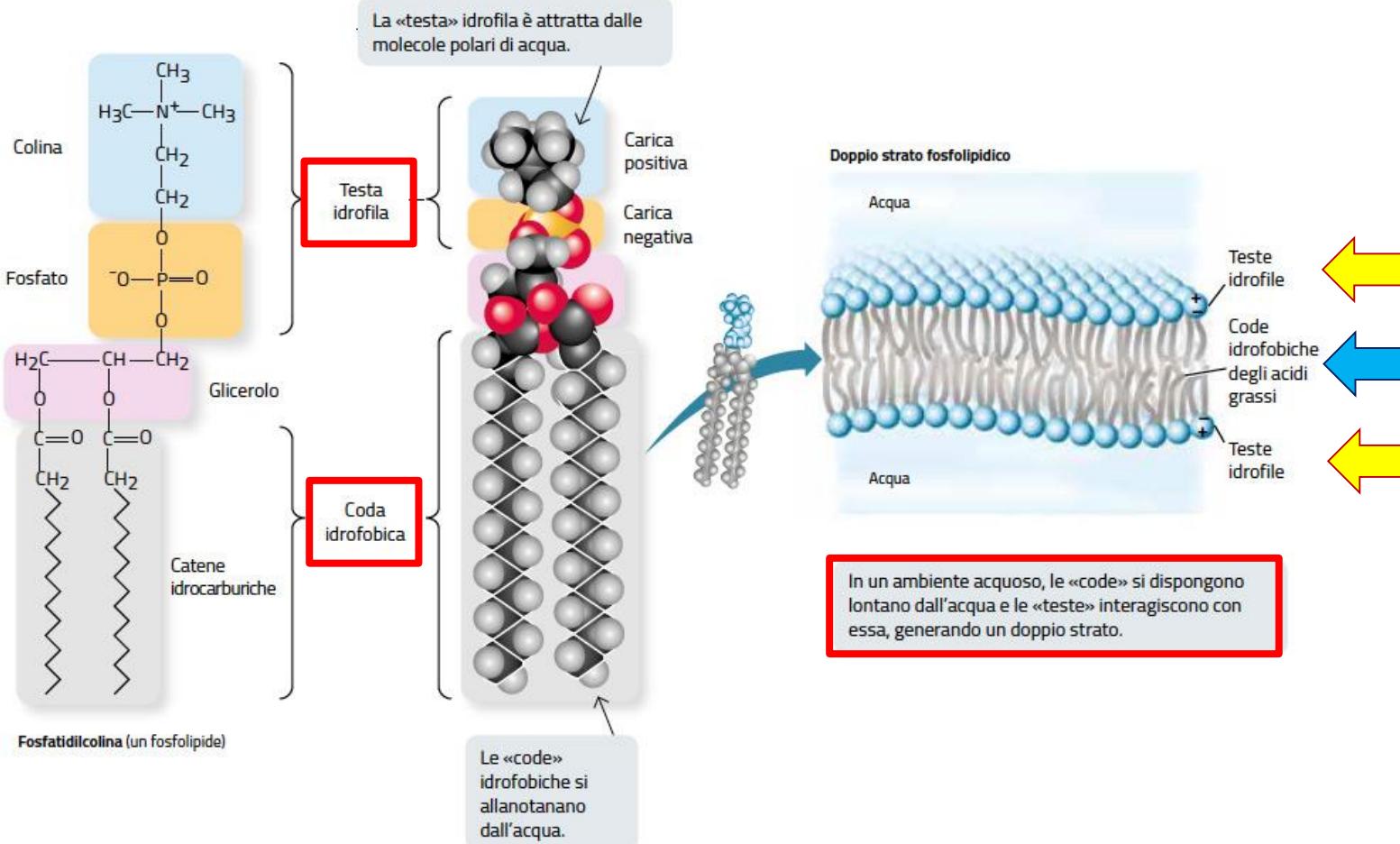




**Hydrophilic head**



**Hydrophobic tails**

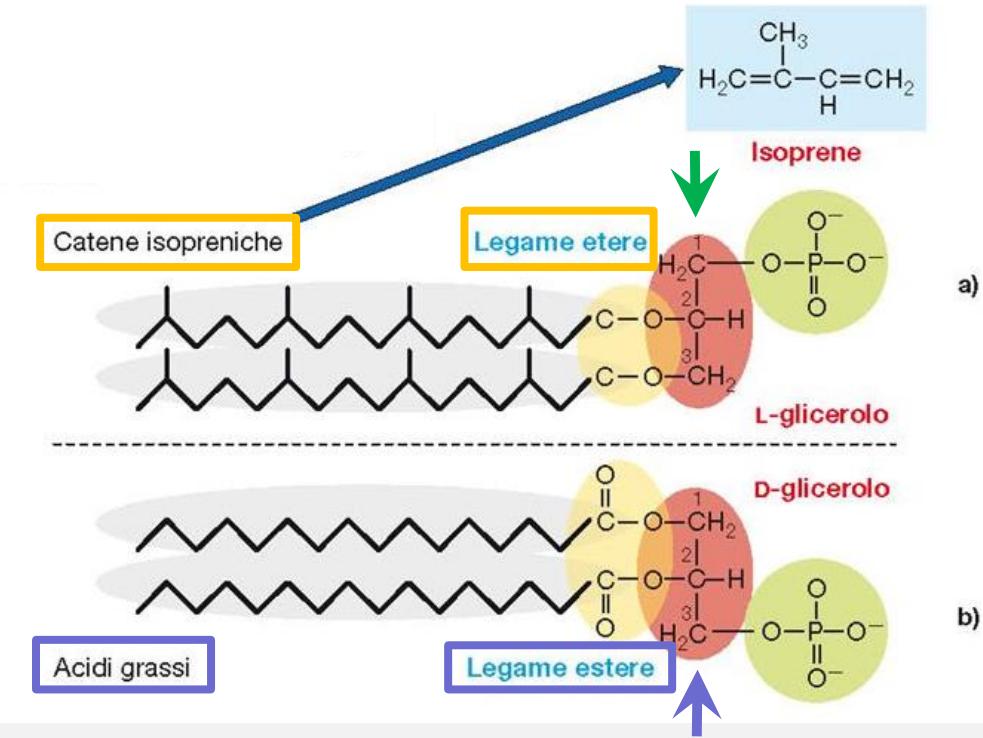
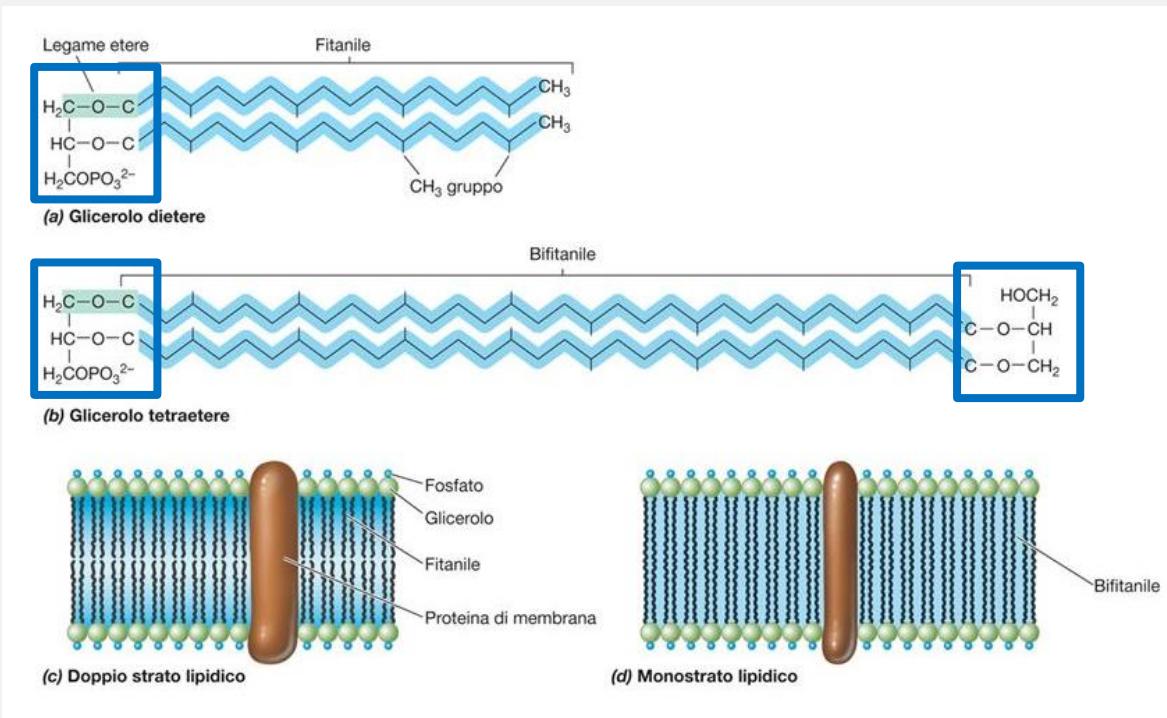


All'interno del doppio strato lipidico troviamo molte proteine.



Negli Archea abbiano alcune differenze importanti:

- Le catene alifatiche sono date da isoprenoidi e non acidi grassi
- Il legame tra glicerolo e catene isoprenoidi è etere e non estere
- Il glicerolo lega il fosfato in C1 anziché C3



- eteri tra due catene isoprenoidi e un glicerolo oppure
- eteri tra due catene isoprenoidi e due gliceroli



# Funzioni della membrana plasmatica nei Procarionti

---

- **Barriera selettiva di permeabilità:** regola il trasporto di nutrienti/prodotti metabolici.
- **trasporto di soluti: attraverso trasporto passivo o attivo**
- **trasduzione del segnale.**
- **sintesi dei componenti di parete;**
- **replicazione del DNA e formazione del setto al momento della divisione cellulare;**
- **produzione di energia: respirazione e fotosintesi;**

**L'interno della cellula NON è suddiviso in organuli delimitati da membrane e alcune funzioni metaboliche come la respirazione e la fotosintesi sono associate ai mesosomi.**



**Le membrane cellulari batteriche formano invaginazione della membrana citoplasmatica di notevoli dimensioni, di forma irregolare dette: **mesosomi**.**

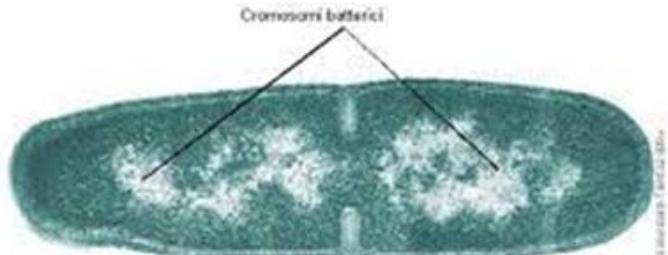
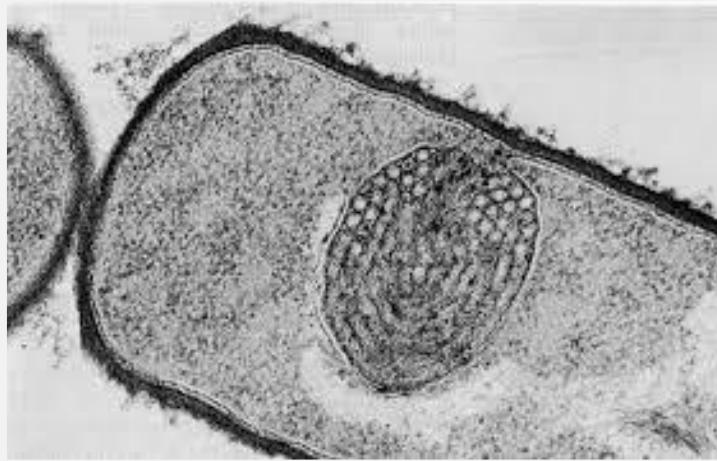


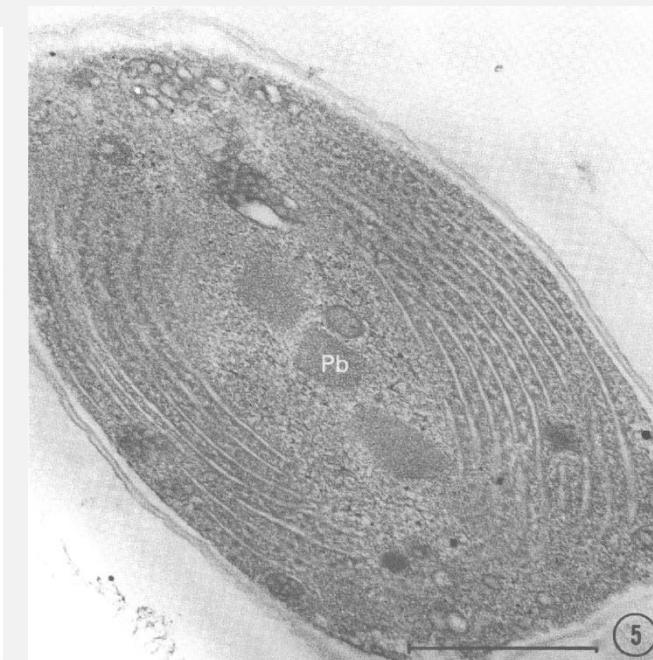
Figura 8.18

**1- mesosomi settali**, che intervengono nella formazione del setto durante la divisione cellulare;

**2- mesosomi laterali**, che costituiscono una piattaforma sulla quale si associano proteine cellulari, quali enzimi della catena respiratoria, e il DNA durante la scissione binaria.



**Nei batteri fotosintetici, i pigmenti dei centri di reazione sono posti in profonde intorflessioni della membrana plasmatica e si trovano subito sotto di essa (**tilacoidi**)**



# Parete Cellulare

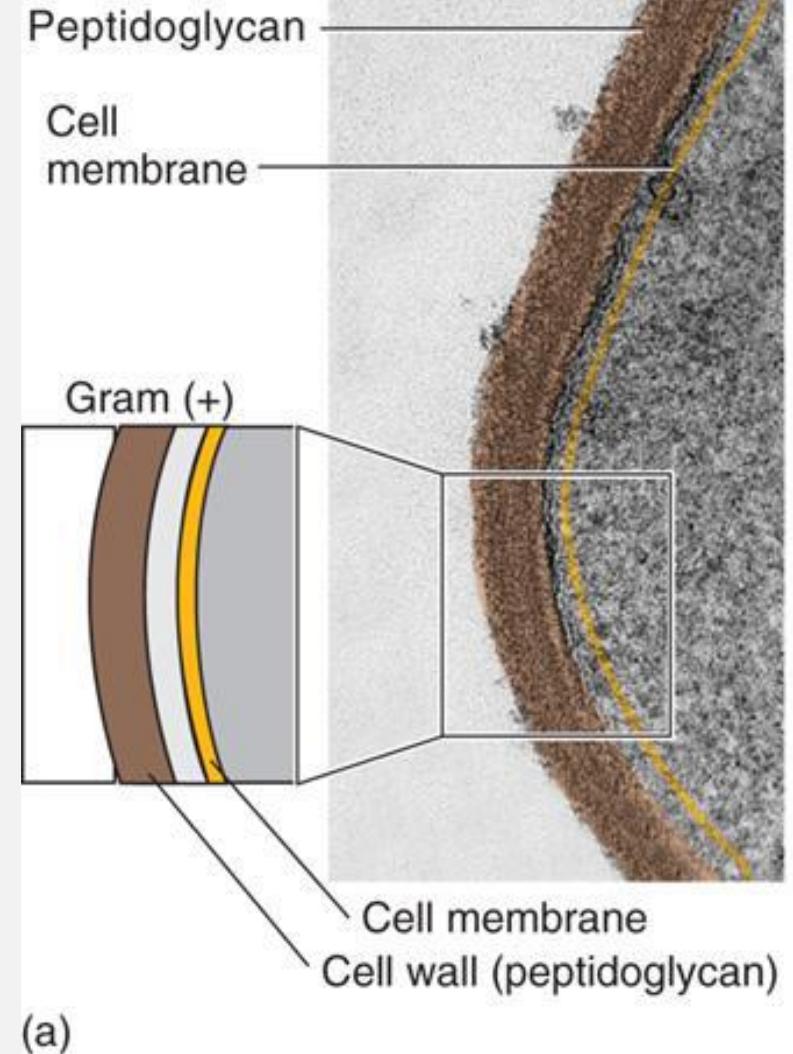
I procarioti sono provvisti di una parete cellulare la cui funzione è:

- Protezione dalla lisi per squilibrio osmotico
- Mantenimento della forma
- Protezione meccanica
- Negli organismi privi di capsula la parete serve anche come struttura di riconoscimento.

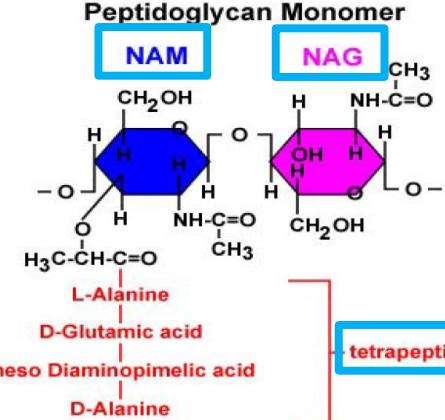
Tale ruolo di contenimento viene svolto, negli eubatteri, dal peptidoglicano o mureina.

Il peptidoglicano forma uno strato all'esterno della membrana plasmatica.

Esso rappresenta fino al 90% del materiale di parete nei Gram+.



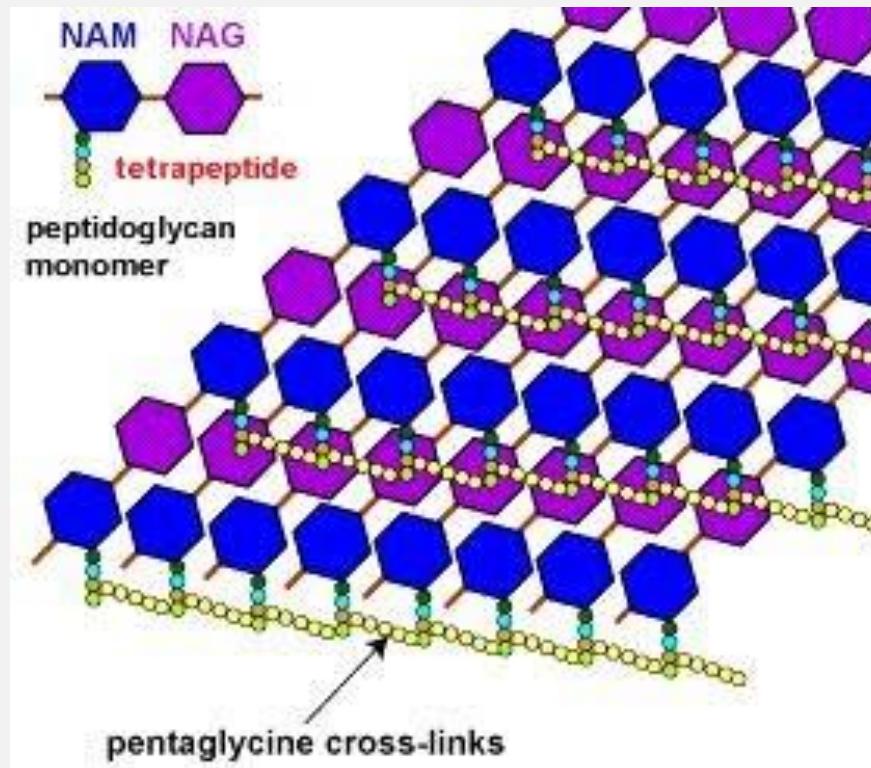
## Il monomero della mureina



Il peptidoglicano è una struttura rigida in cui catene lineari costituite da monomeri di formati da **Acido N-acetilmuramico e N-acetyl glucosamina** a cui è legato un **tetrapeptide**.

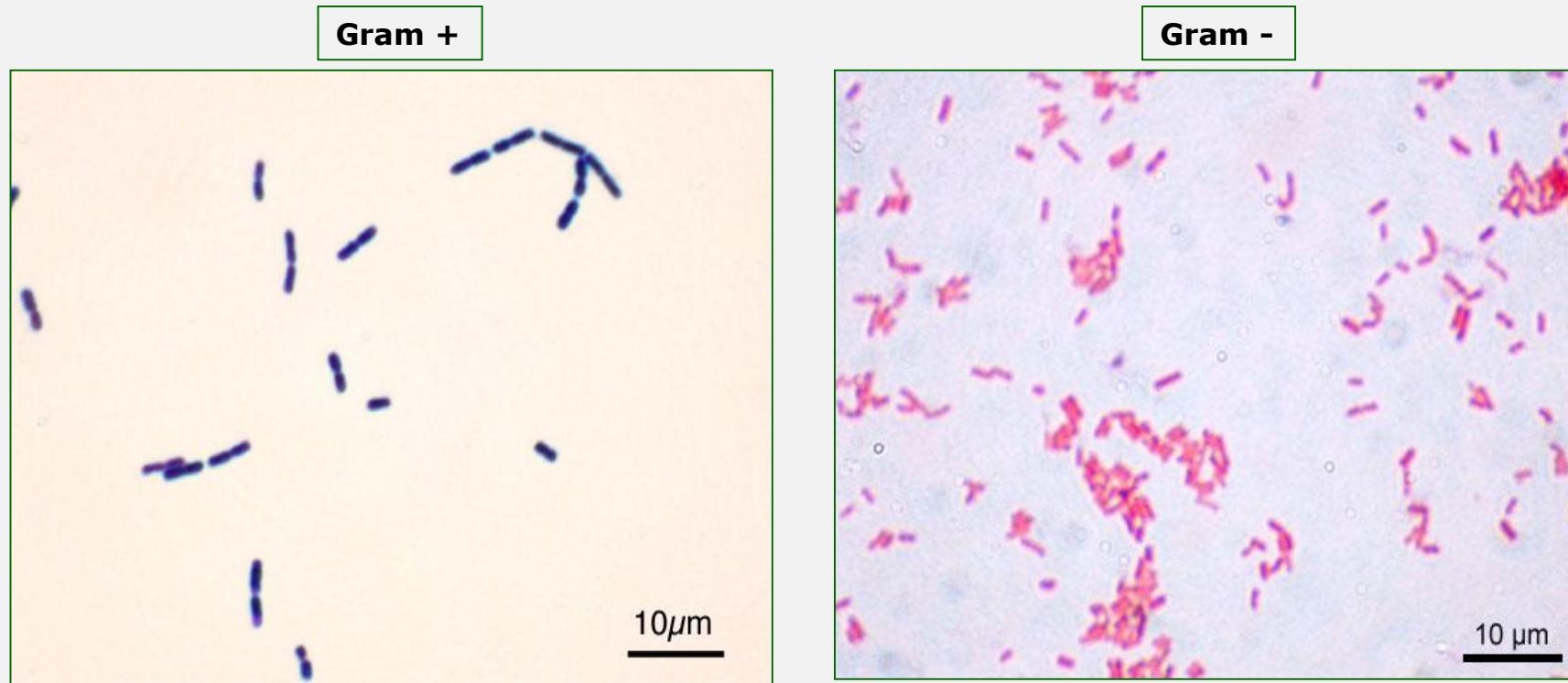
Le catene di peptidoglicano sono unite tra loro mediante legami crociati di natura peptidica

o Lisina



## Nei Gram negativi, la struttura degli strati esterni alla membrana plasmatica è più complessa.

Nel 1884 Gram mise a punto un metodo di colorazione che permetteva di distinguere due gruppi di procarioti: **Gram+** e **Gram-** a seconda che fossero o meno in grado di trattenere il colorante violetto di genziana

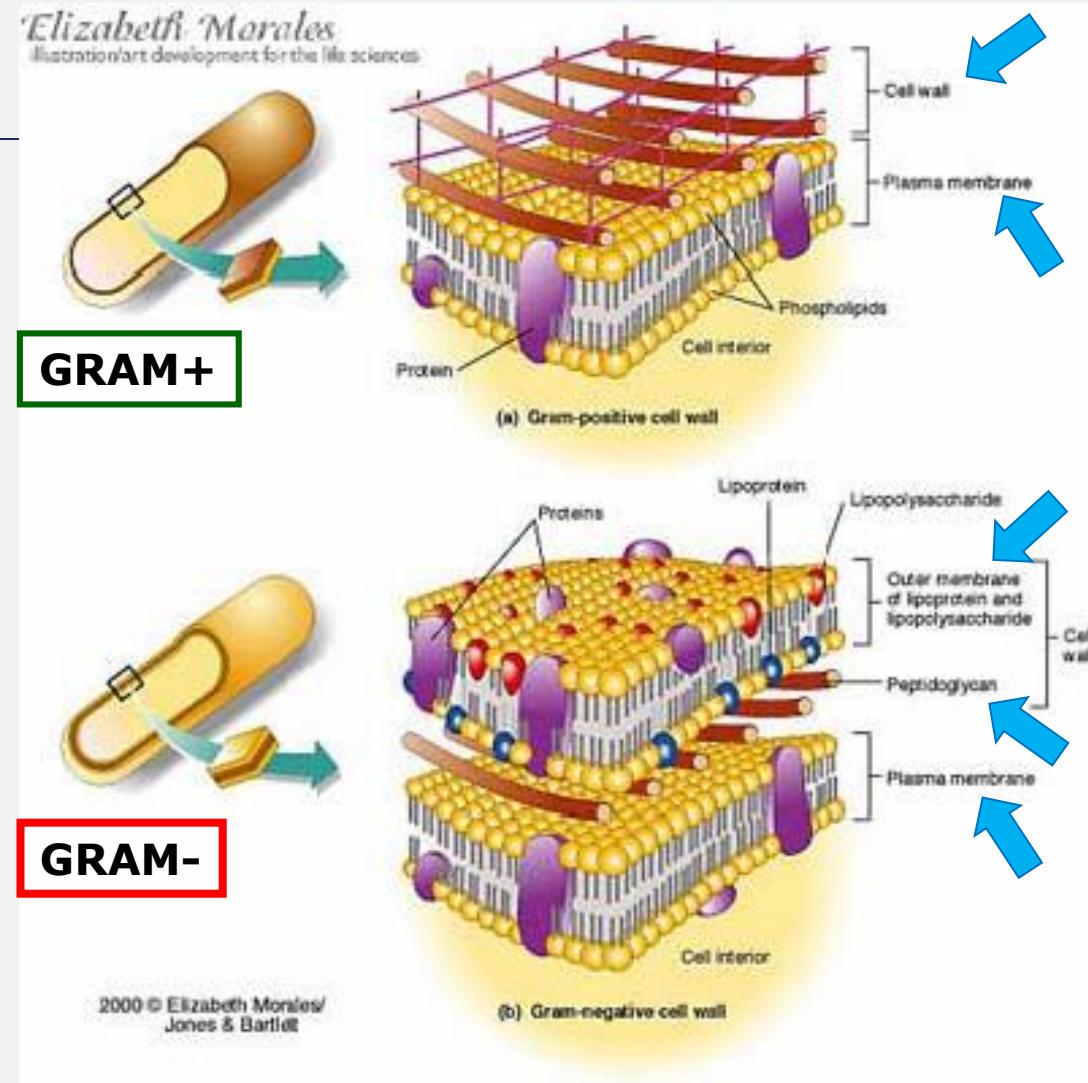


**Perché i Gram- non si colorano con il violetto di genziana?**

Nei Gram- troviamo:

- a) Membrana plasmatica
- b) una membrana esterna

c) uno spazio compreso tra la membrana esterna e plasmalemma detto **Spazio periplasmatico** in cui si trovano **peptidoglicano**, proteine, lipoproteine, lipopolisaccaridi (mentre mancano gli **Acidi Teicoici** caratteristici dei Gram+).



I Gram- non si colorano con il violetto di genziana poiché il peptidoglicano non è esposto all'ambiente esterno

Tali proprietà della parete sono usate a scopo tassonomico

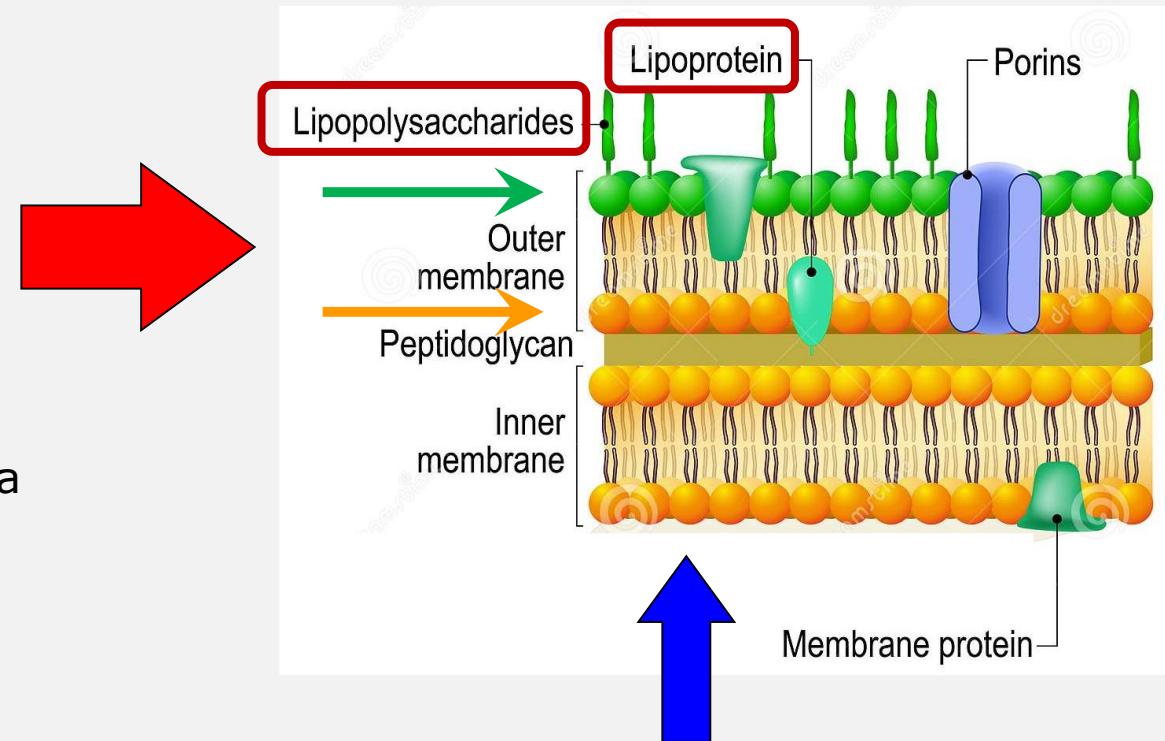
**La membrana esterna dei Gram- è molto diversa dalla membrana plasmatica per quanto riguarda la composizione lipidica ed è meno fluida e dinamica.**

**La membrana esterna è asimmetrica: il foglietto esterno è formato da lipopolisaccaridi (fosfolipidi con lunghe catene di polisaccaridi anche ramificati).**

Membrana esterna unita al peptidoglicano tramite una lipoproteina (detta lipoproteina di Braun)

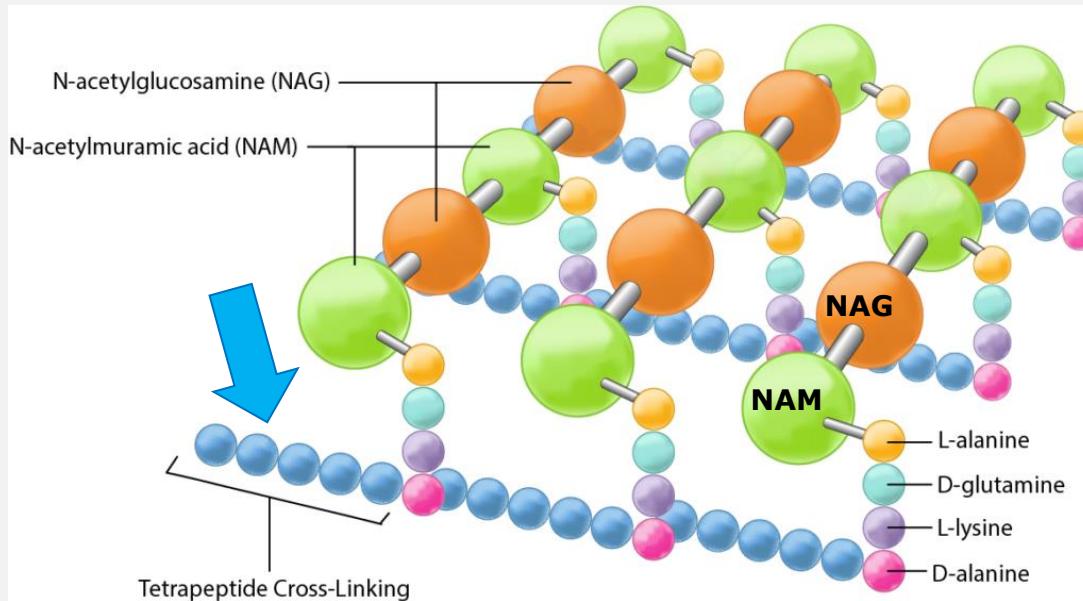
#### **Funzioni membrana esterna:**

- Setaccio molecolare; la presenza di *porine* consente il passaggio a molecole organiche ma esclude quelle ad alto peso molecolare.
- I lipopolisaccaridi sembrano costituire una struttura di difesa a batteriofagi e a fagocitosi
- Possono fungere da fattori di adesione cellulare e di aggregazione



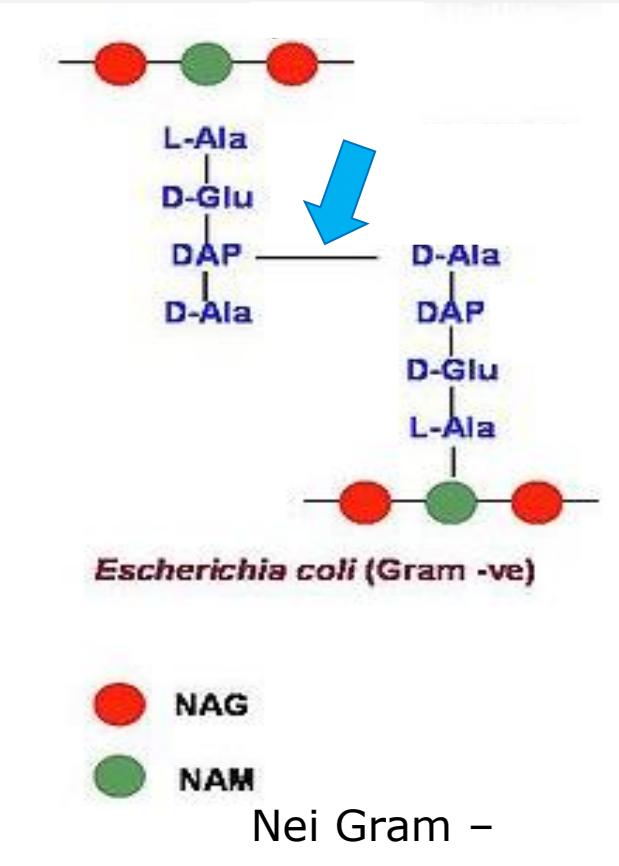
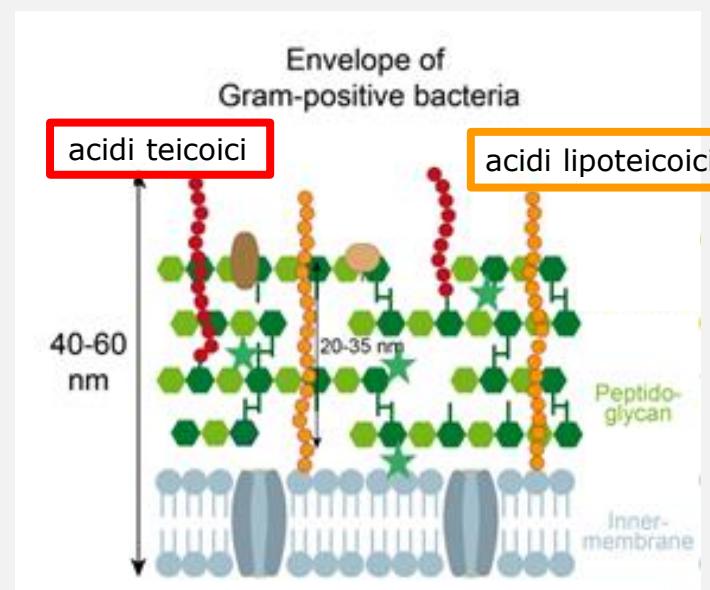
The **Internal Membrane** is a phospholipid bilayer

## Anche le modalità e alcuni componenti della parete sono differenti tra batteri Gram + e Gram -



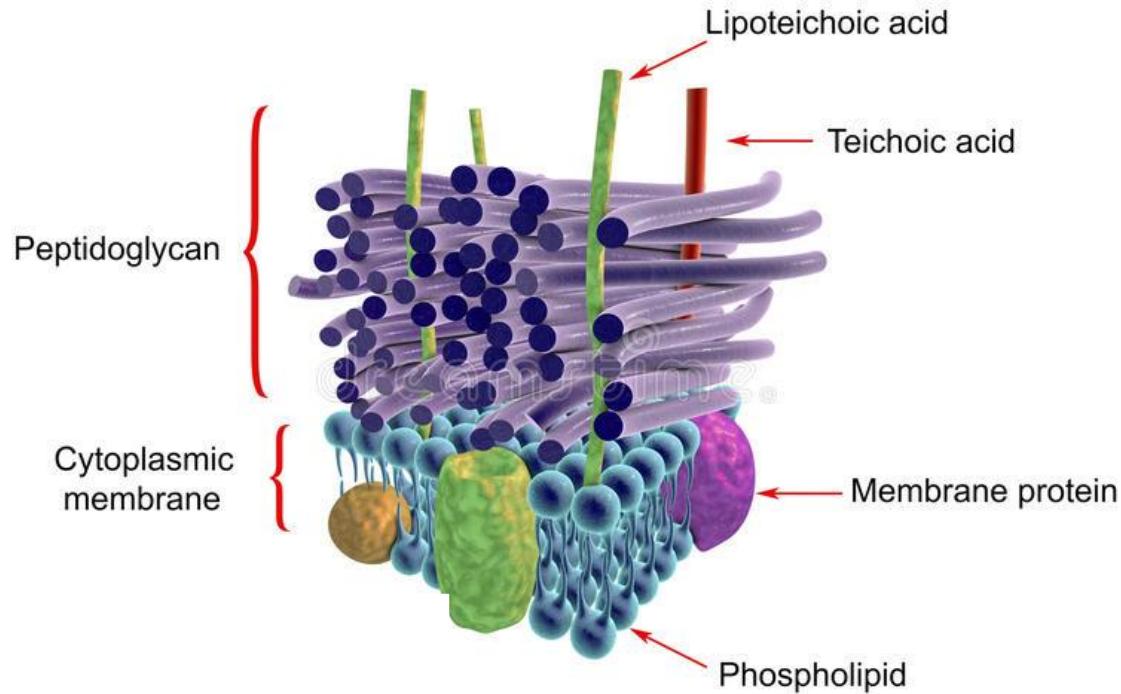
Presente solo nei Gram+; è costituito da Glicina

Componenti aggiuntivi della parete cellulare dei **Gram positivi**: acidi teicoici e lipoteicoici

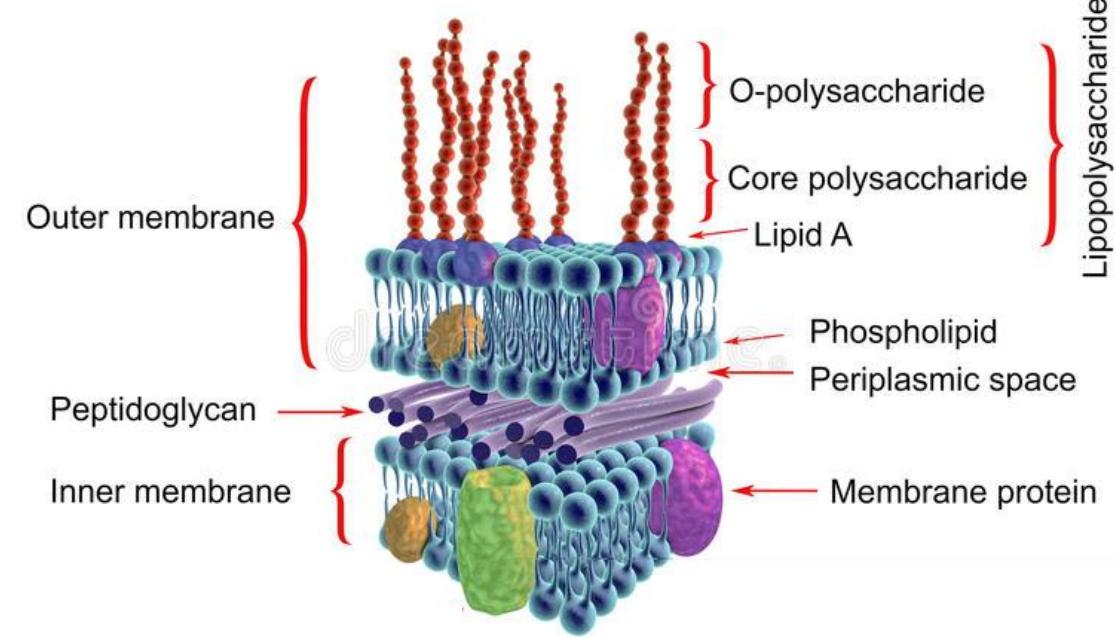




Gram +



Gram -

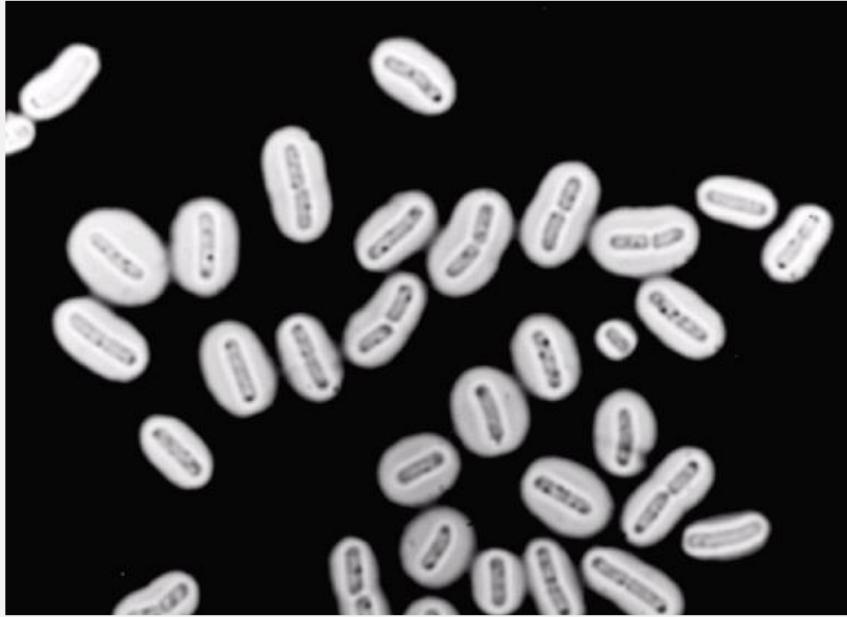


Negli **Archeobatteri** la composizione della parete è molto variabile ed in alcuni casi non è ancora chiarita.

Gli Archea non hanno peptidoglicano. Alcuni di essi hanno una molecola simile (pseudo peptidoglicano) mentre altri hanno pareti fatte di proteine e/o altri polimeri.



## Rivestimento esterno o capsula

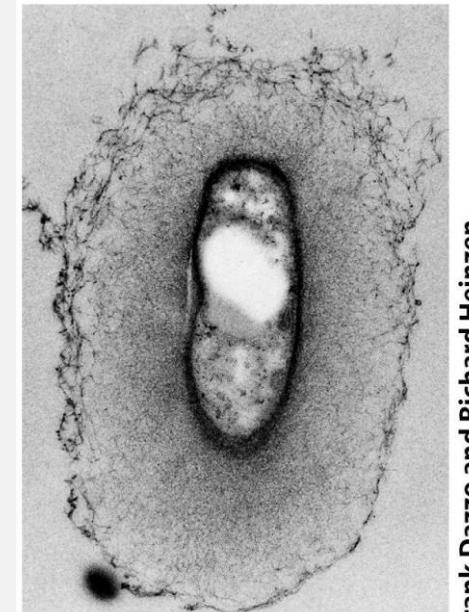


## Che cosa è?

Comprende componenti extra-cellulari stratificati, che alcuni batteri presentano all'esterno della parete; può essere rigida (capsula) oppure mucosa.

Di solito tale rivestimento consiste in eteropolisaccaridi di composizione variabile, tranne che nel caso di alcune specie genere *Bacillus* in cui è di natura proteica (glutammato).

In *Acetobacter* è costituita da microfibrille di cellulosa



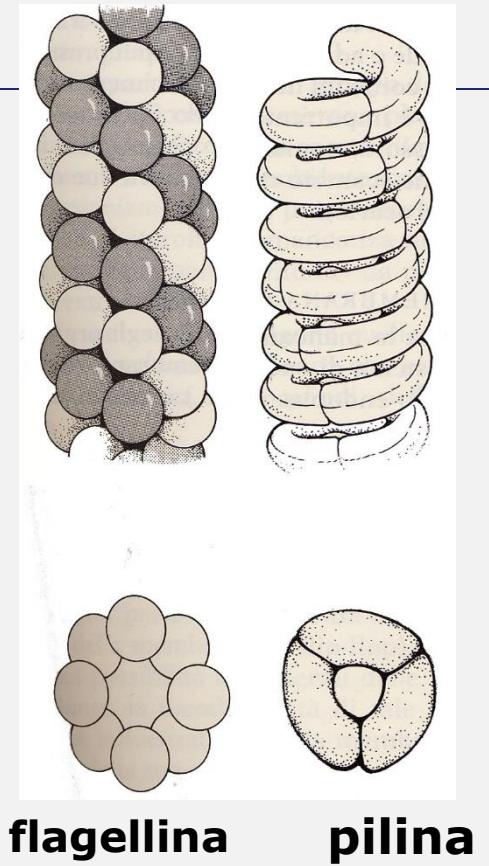
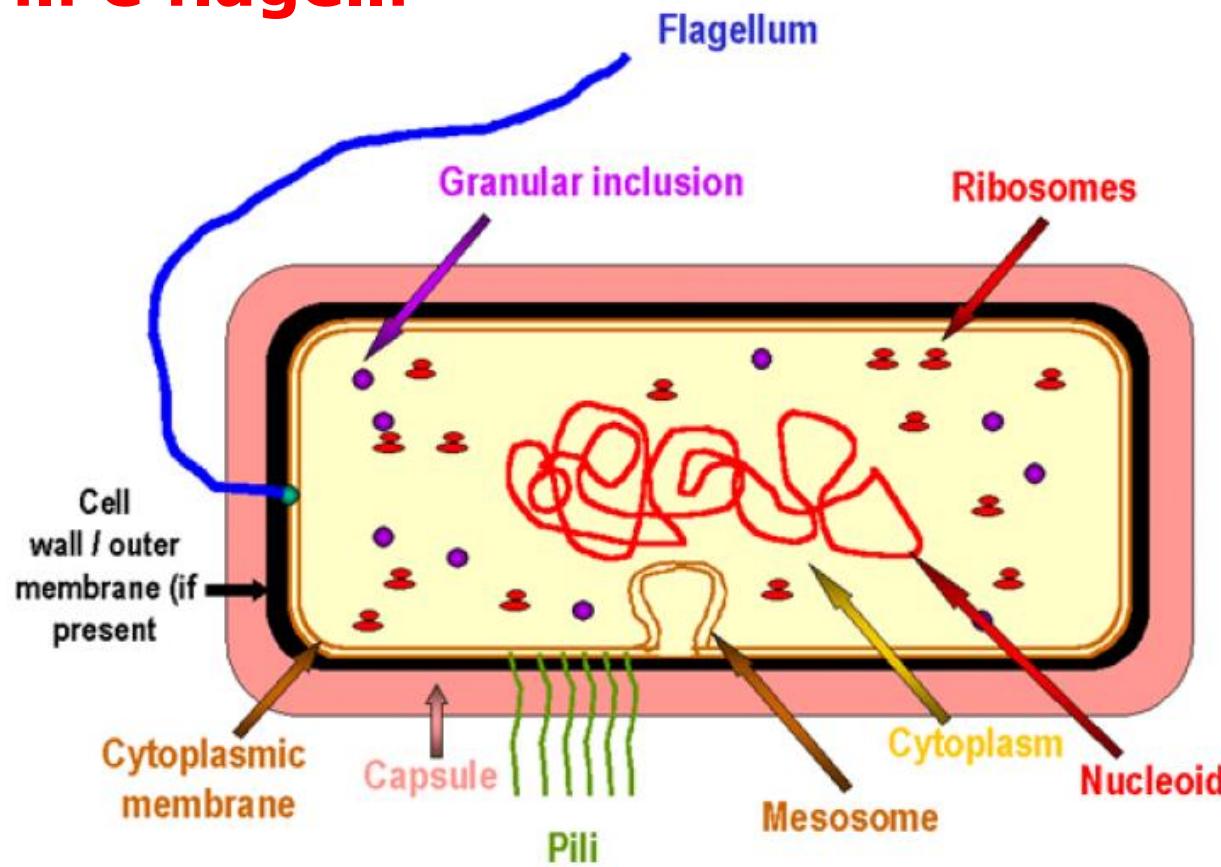
### A cosa serve?

- Riconoscimento** delle superfici cui aderire. Ad es. il riconoscimento della cellula ospite in caso di batteri patogeni;
- Trattenere l'acqua** evitando l'essiccamiento e contribuendo a mantenere un ambiente favorevole al batterio;
- Protezione** resistenza alla fagocitosi da parte dei macrofagi dell'ospite. Alcuni batteri sono molto infettivi quando sono provvisti di capsula, mentre quando ne sono privi la loro pericolosità diminuisce.

In *Acetobacter* la capsula di cellulosa serve per il galleggiamento

Figure 4-39b Brock Biology of Microorganisms 11/e  
© 2006 Pearson Prentice Hall, Inc.

# Pili e flagelli



I flagelli si distinguono dai pili per le loro maggiori dimensioni

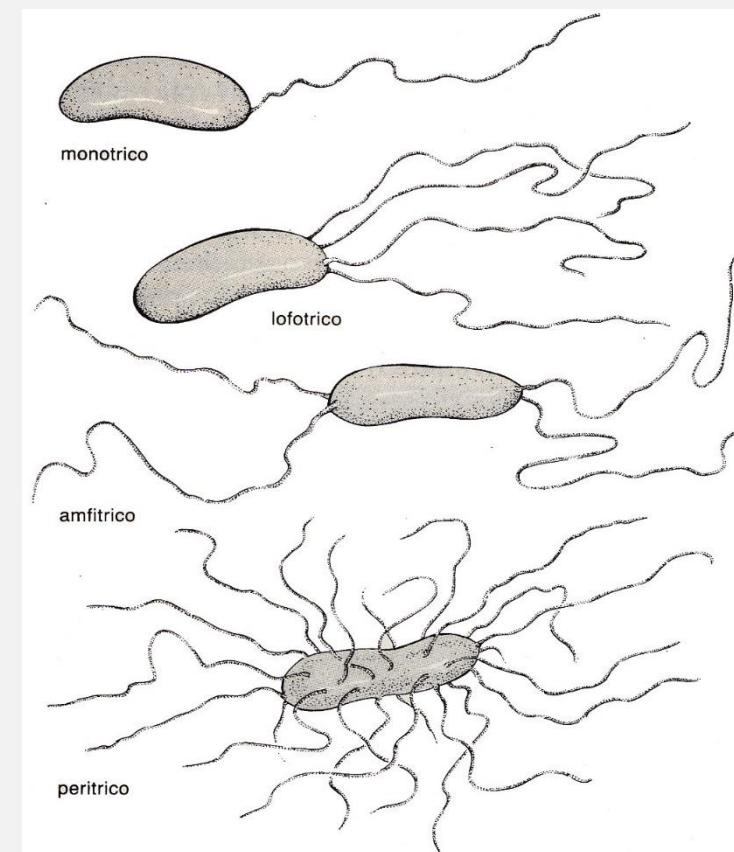
Entrambe le strutture sono costituite da subunità proteiche :  
**Flagellina** e **Pilina**, organizzate a spirale in modo da delimitare una cavità interna

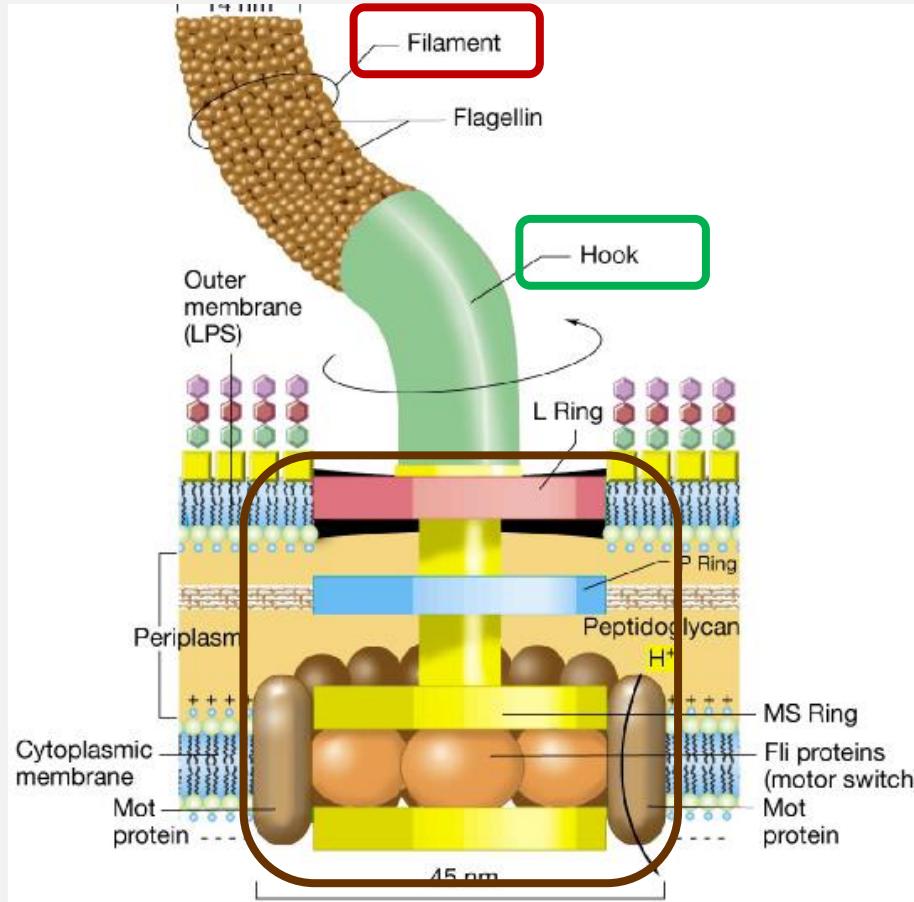
# FLAGELLI

**Sono appendici filiformi di natura proteica  
(flagellina) che conferiscono  
MOTILITÀ**

Conferiscono il vantaggio dei movimenti chemiotattici.  
Possono anche rispondere a gradienti di concentrazione dell'O<sub>2</sub>  
(movimenti aerotattici).  
Nel caso di batteri fotosintetici flagellati permettono il movimento  
verso zone diversamente illuminate (movimenti fototattici).

**Numero e zona di inserzione sulla superficie  
cellulare molto variabili ed usati come criteri di  
classificazione**





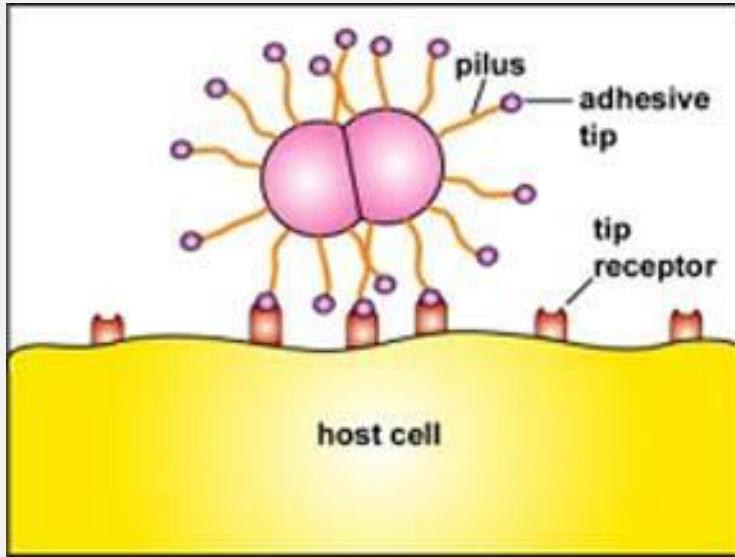
**STRUTTURA:** complessa, ma abbastanza costante.  
Tre parti principali:

- 1) **FILAMENTO:** subunità tutte uguali di una proteina contrattile: **FLAGELLINA** (proteina molto conservata);
- 2) **UNCINO (o manicotto)**
- 3) **CORPO BASALE:** àncora il flagello alla cellula e fornisce energia per il suo movimento. Composto da anelli proteici

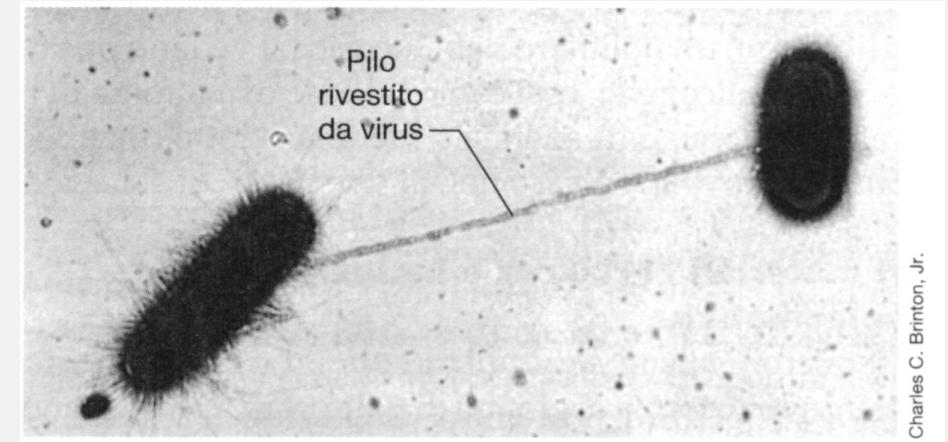
## I PILI

**PILI:** Costituiti da subunità proteiche di **PILINA**

***Pili Comuni:*** sono numerosi e sono strutture **ADESIVE**  
**(FATTORI DI COLONIZZAZIONE)**  
Talvolta hanno **PROPRIETA' ANTIFAGOCITARIE**



***Pili Sessuali:*** più lunghi dei pili comuni;  
Intervengono nella CONIUGAZIONE e rappresentano  
spesso dei RECETTORI PER I BATTERIOFAGI



# Mitosi negli eucarioti e scissione binaria nei procarioti

Il fenomeno della suddivisione di una cellula in due cellule figlie si osserva sia negli organismi procarioti, sia negli eucarioti.

Propriamente, si parla di **mitosi** nelle cellule eucariotiche, nelle quali il processo è caratterizzato da quattro fasi (profase, metafase, anafase e telofase) seguite dalla citodieresi.

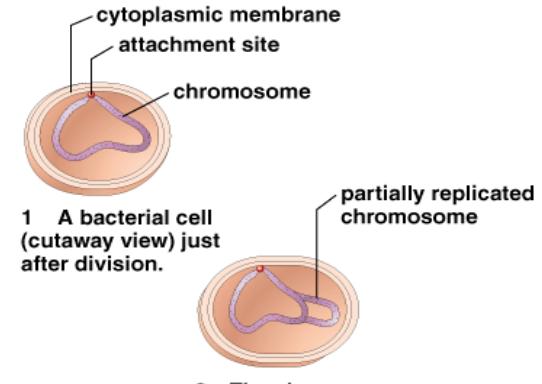
Nei procarioti non si possono riconoscere le quattro fasi tipiche della mitosi, e la divisione cellulare avviene in modo più semplice perché il patrimonio genetico non è contenuto in un nucleo ma si trova disperso nel citoplasma, in forma di cromosoma circolare.

Inoltre, il DNA dei procarioti non è legato alle proteine basiche che si ritrovano, invece, negli avvolgimenti del DNA eucariotico e, di conseguenza, anche la sua duplicazione avviene in modo più rapido e semplice di quanto avvenga negli eucarioti. Nei procarioti, dunque, si preferisce parlare di

## scissione binaria



Il cromosoma circolare di una cellula batterica è attaccato a una piccola intorflessione della membrana, il mesosoma.



©Brooks/Cole Publishing Company/ITP

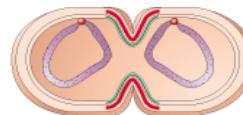
Quando ha luogo la duplicazione del DNA, si forma una seconda molecola di acido nucleico circolare che prende contatto con un punto della membrana prossimo al mesosoma originario;



il progressivo ingrandimento della cellula e l'allontanamento dei due mesosomi determina l'allontanamento delle due molecole identiche di DNA e la loro ripartizione in due cellule figlie.



Nelle cellule batteriche il materiale genetico si duplica e si distribuisce ai due poli della cellula batterica, la quale si allunga e alla fine si divide in due cellule figlie identiche alla cellula madre.



5 New membrane and wall material start growing through the cell midsection.



6 Membrane and wall material deposited at the cell midsection divide the cytoplasm in two.

©Brooks/Cole Publishing Company/ITP



# Produzione di Energia

---

**Il metabolismo e la fisiologia dei procarioti cambia nei vari taxa.**

**In relazione all'O<sub>2</sub> si distinguono:**

**1- specie aerobie;**

**2- specie anaerobie (es. Archeobatteri);**

**I cianobatteri (gram -) sono aerobi;**

**Gli enzimi respiratori sono sulla membrana plasmatica, di solito separati da quelli della fotosintesi, o sulle membrane tilacoidali.**

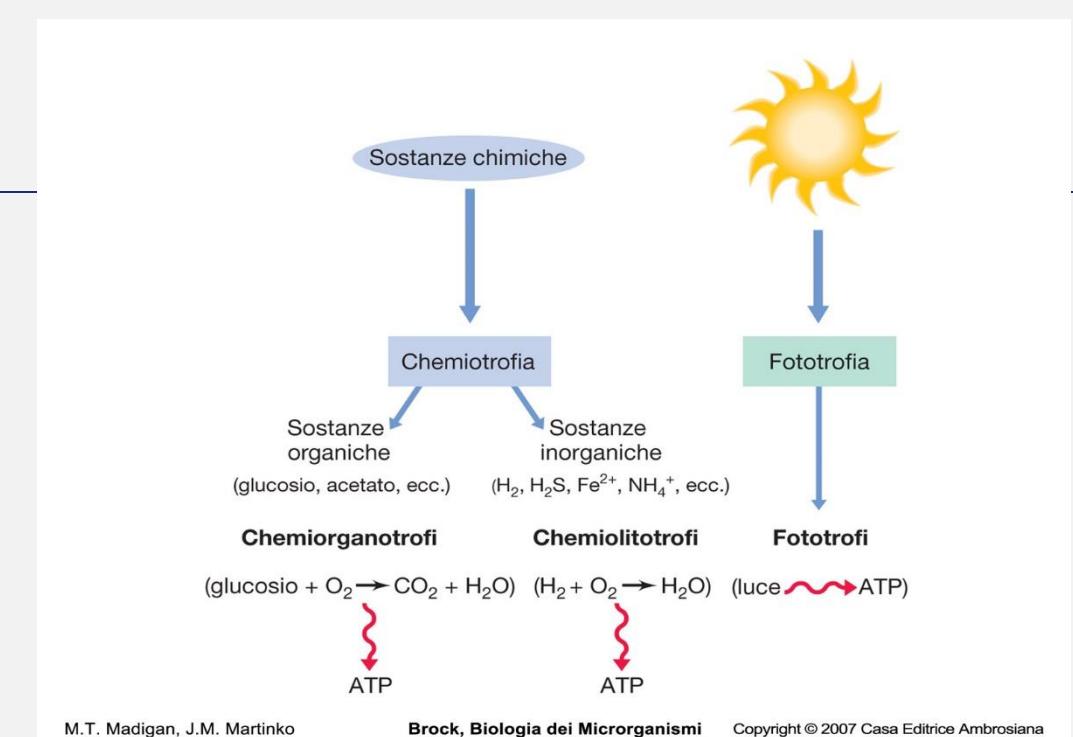
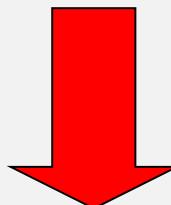
**La membrana tilacoidale può essere pertanto sia la sede del processo fotosintetico che di quello respiratorio**





# Nutrizione:

**Specie eterotrofe**  
**Specie autotrofe**



**Fotosintesi** è la trasformazione dell'energia luminosa in energia chimica sotto forma di en. di legame (ATP) e di energia potenziale (NADPH) che viene poi usata per ridurre ed organicare la CO<sub>2</sub>

L'apparato fotosintetico sia negli eubatteri che negli eucarioti è localizzato all'interno di membrane che derivano dalle invaginazioni del plasmalemma che si chiamano **Tilacoidi** (nei cianobatteri e nei cloroplasti delle cellule vegetali)





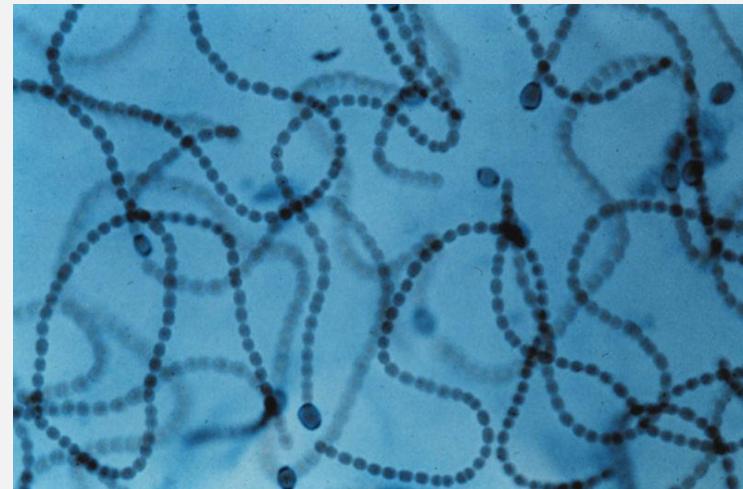
# Cianobatteri o alghe azzurre

Sono gli unici procarioti che fanno fotosintesi ossigenica molto simile a quella che avviene nei cloroplasti delle cellule eucariotiche; Per questa ragione i cianobatteri sono tradizionalmente studiati dai botanici, anche se oggi sono inclusi nei testi di microbiologia.

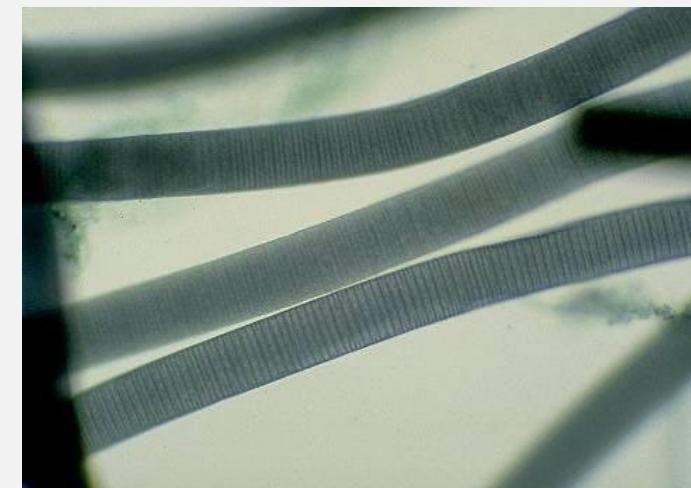
Il pigmento fotosintetico indispensabile è la clorofilla a (centro di reazione)

unitamente a pigmenti accessori come:

**carotenoidi (caroteni e xantofille)  
ficobiline**



Nostoc



Oscillatoria

Sono Gram -



# LE FASI DELLA FOTOSINTESI



## Fase luminosa

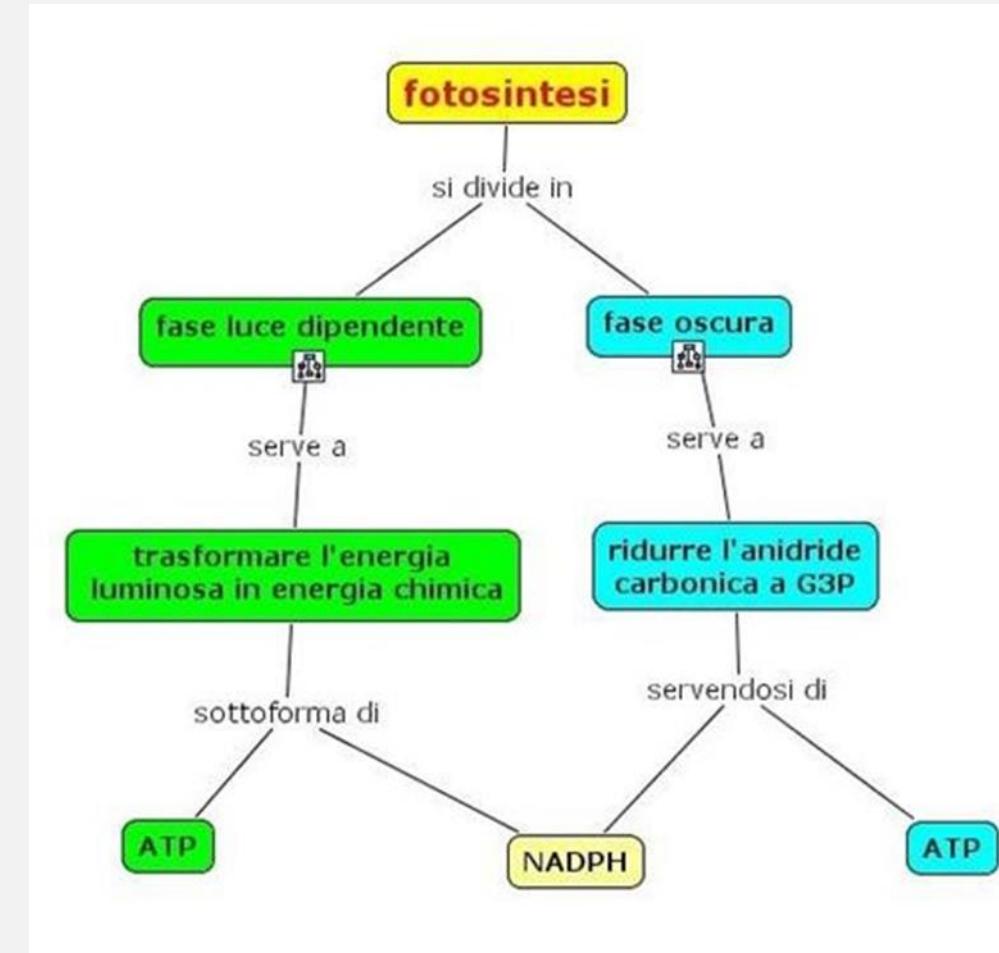
- 1.Richiede la luce che è trasformata dalla clorofilla
- 2.produce ATP ed NADPH;
3. Produce ossigeno come scarto.

Intervengono due fotosistemi che contengono i pigmenti necessari per la cattura della luce.

## Fase oscura

- 1.Non richiede luce;
- 2.sfrutta i prodotti della fase luminosa (ATP e NADPH);
- 3.produce **GLUCOSIO**

Viene chiamato Ciclo di Calvin



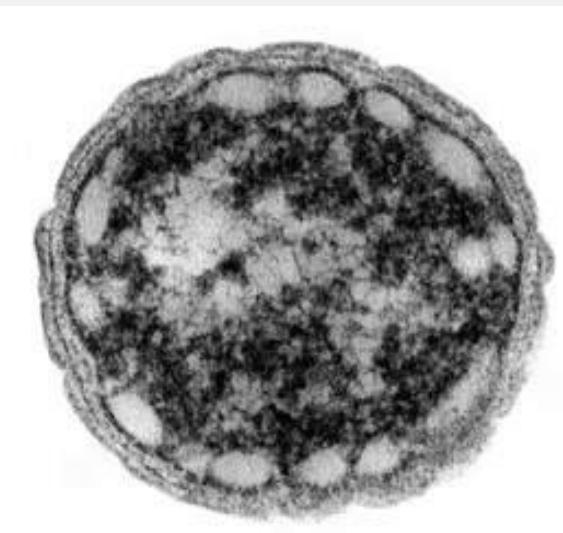
# Fotosintesi ossigenica.....esiste una fotosintesi non ossigenica?

Alcuni batteri non hanno la clorofilla a, e utilizzano altre molecole diverse dall'acqua come donatore di elettroni senza produrre come prodotto di scarto ossigeno molecolare.

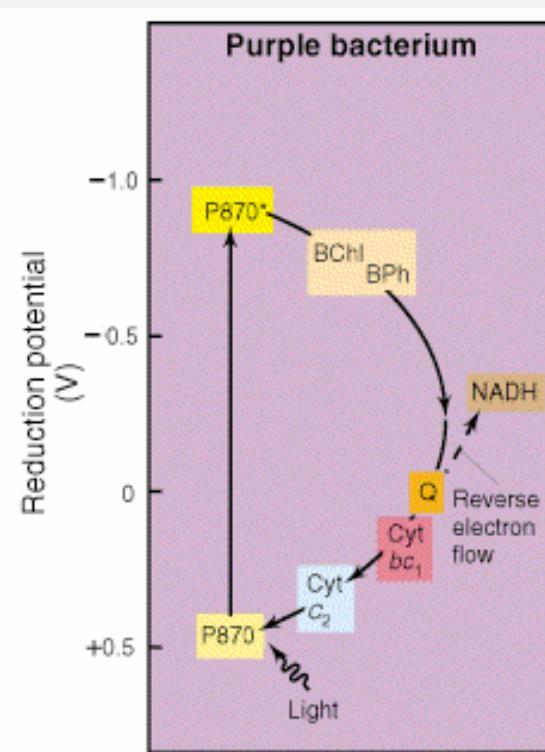
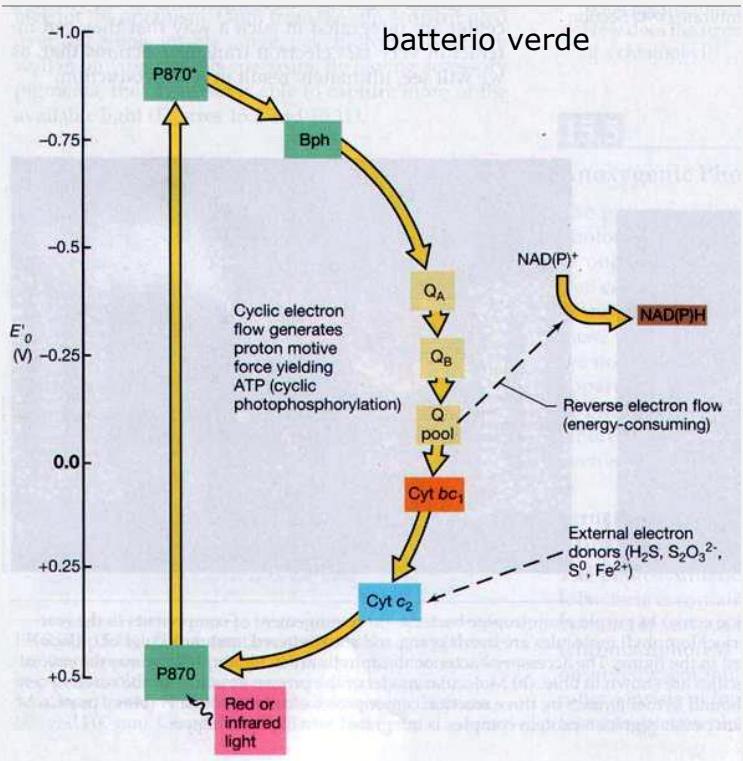
**Probabilmente questo processo era presente nelle prime cellule fotosintetiche che vivevano in un'atmosfera priva di O<sub>2</sub>.**

Tra questi batteri vi sono i **BATTERI VERDI** e i **BATTERI PURPUREI** che contengono molecole definite **BATTERIOCLOROFILLE**

Nessuno di questi due gruppi contiene entrambi i fotosistemi PS I e PS II, ma solo uno dei due



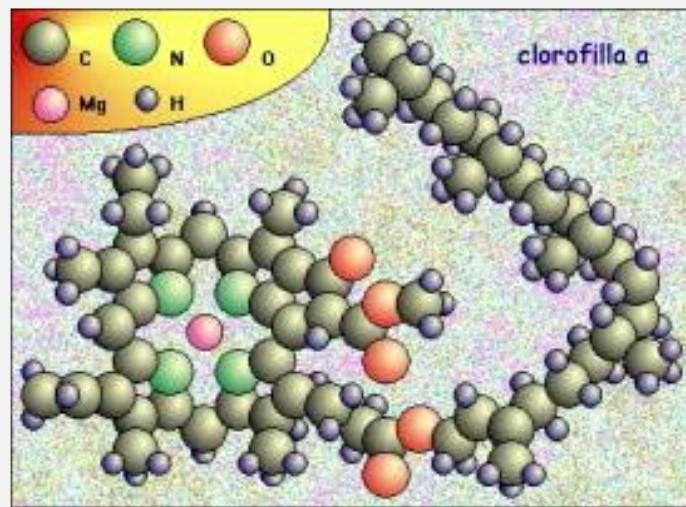
Micrografia elettronica di *Chlorobium tepidum*, batterio verde sulfureo



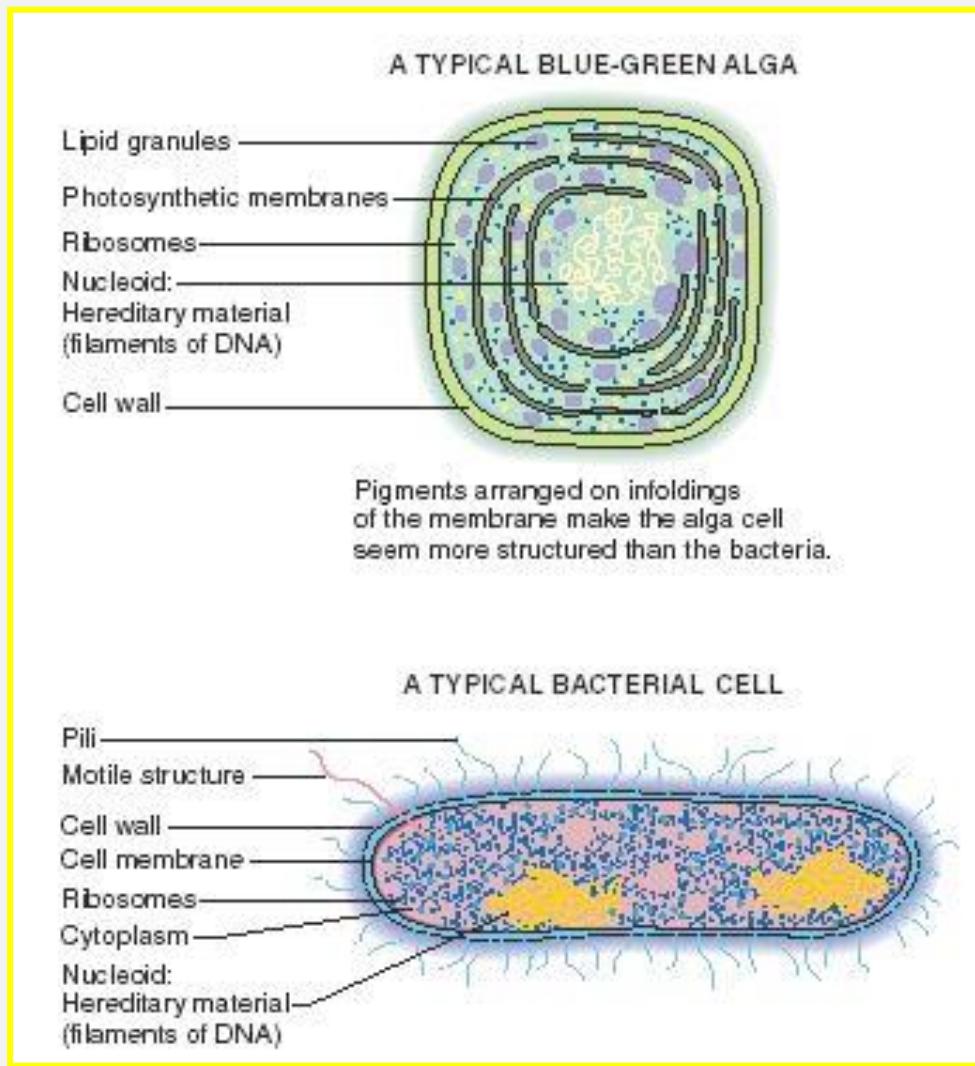
Con la fotosintesi anossigenica viene usata una minore quantità di luce solare rispetto a quella catturata dal complesso apparato dei cianobatteri e degli eucarioti.

In base alle caratteristiche degli apparati fotosintetici dei batteri purpurei e dei batteri verdi, si pensa che nel corso dell'evoluzione i fotosistemi dei cianobatteri siano derivati dalla simbiosi tra solfobatteri rossi e verdi.

I cianobatteri si distinguono dagli altri batteri fotosintetici per possedere come pigmento fotosintetico la **clorofilla a** al posto della batterioclorofilla. Questa recupera l'elettrone dall'acqua e libera O<sub>2</sub> durante la fotosintesi.

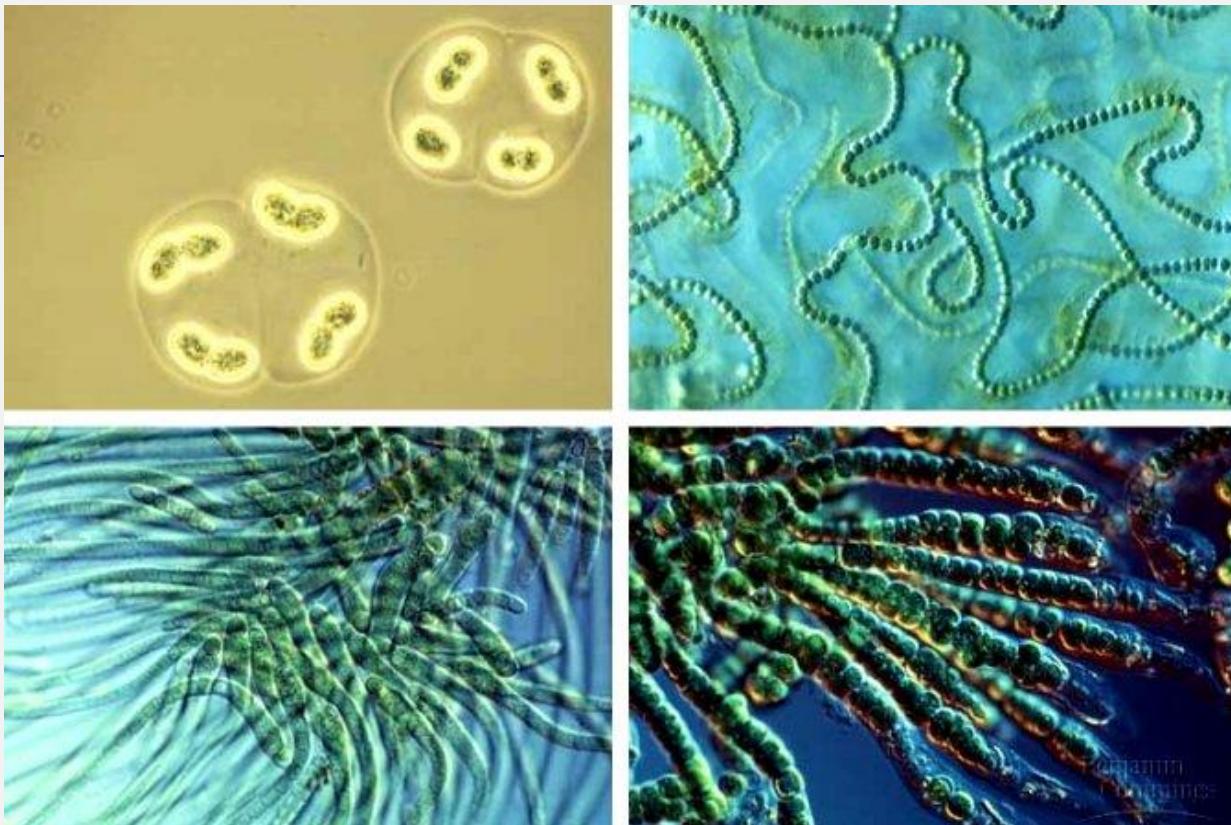


Intervengono due fotosistemi che lavorano in serie



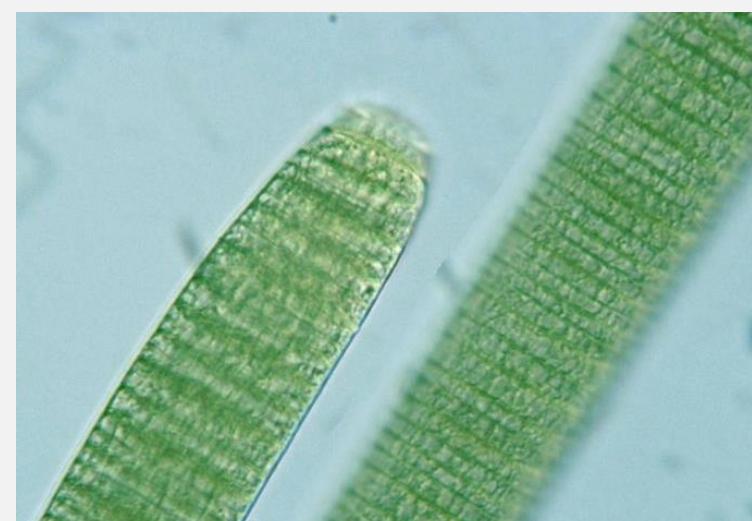
## I cianobatteri comprendono circa 2000 specie

**Essi svolgono un ruolo ecologico estremamente importante nei cicli del carbonio e dell'azoto e altrettanto importante è stato il contributo che questo gruppo di fotoautotrofi ossigenici ha dato nel corso dell'evoluzione di tutti gli organismi vegetali**



**Le loro cellule sono mediamente 5-10 volte più grande delle cellule batteriche**

La maggior parte dei cianobatteri hanno dimensioni comprese tra 1 e 30  $\mu\text{m}$ , ma in alcune specie le dimensioni aumentano notevolmente arrivando fino ai 60  $\mu\text{m}$  di *Oscillatoria princeps*, il più grande procariote noto sul nostro pianeta



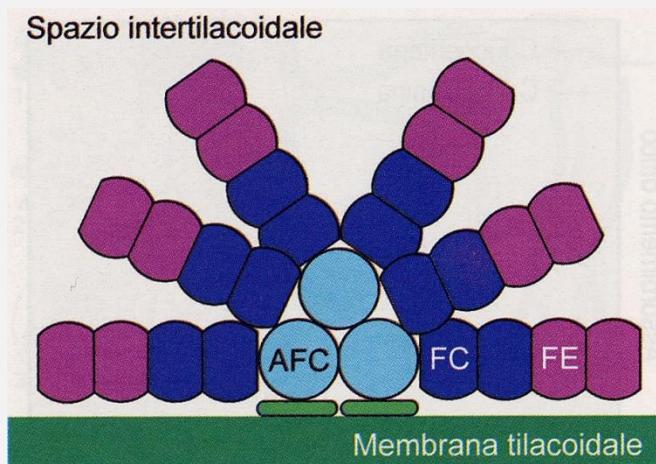
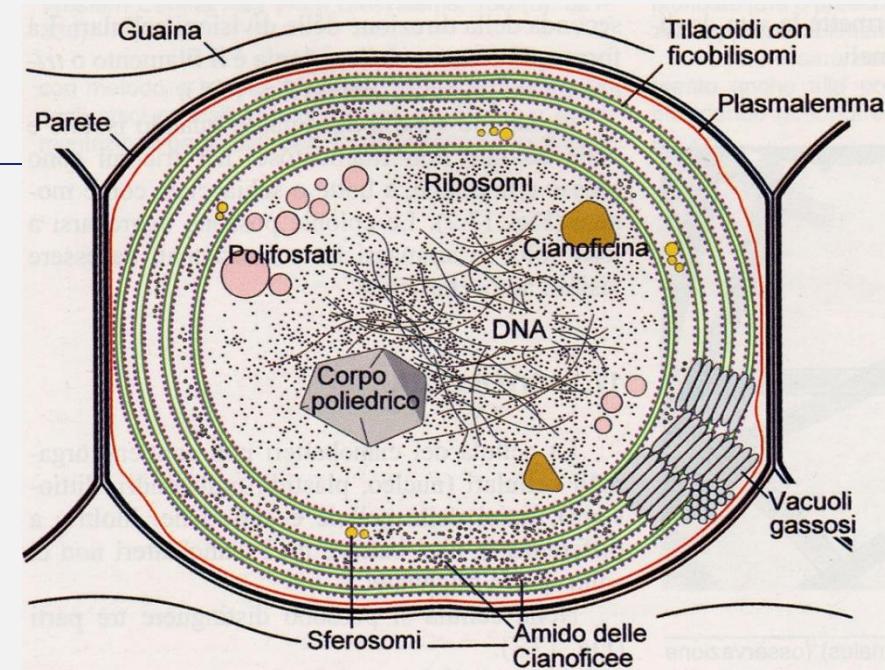


## Le membrane fotosintetiche dei cianobatteri, i tilacoidi, appaiono come invaginazioni della membrana plasmatica

I due lati dei tilacoidi dei cianobatteri presentano entrambi delle strutture emisferiche, i **FICOBILISOMI**, formati in gran parte da tre pigmenti accessori alla fotosintesi:

### FICOBILINE

<b>FICOERITRINA</b>	→	Rossa	→ 560-590 nm
<b>FICOCIANINA</b>	→	Azzurra	→ 610-630 nm
<b>ALLOFICOCIANINA</b>	→	Azzurra	→ 650 nm



Oltre alla clorofilla a e alle ficobiline tra i pigmenti vi sono anche alcuni carotenoidi

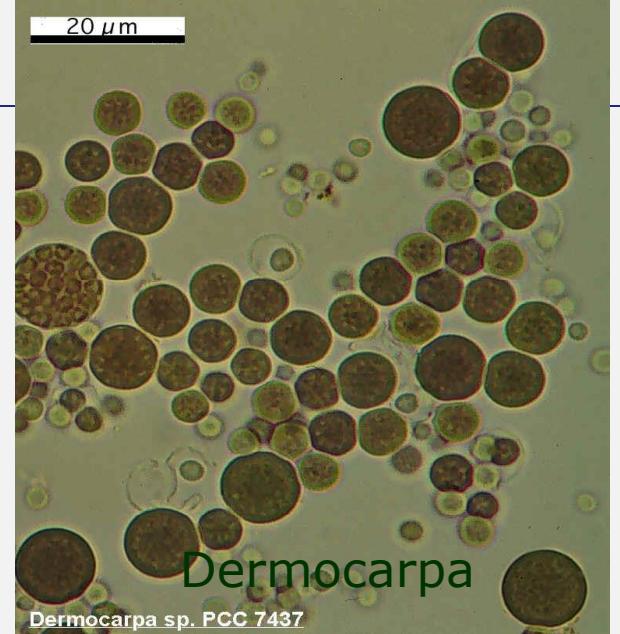




## ORGANIZZAZIONE

Possono essere

**unicellulari  
coloniali non filamentosi**

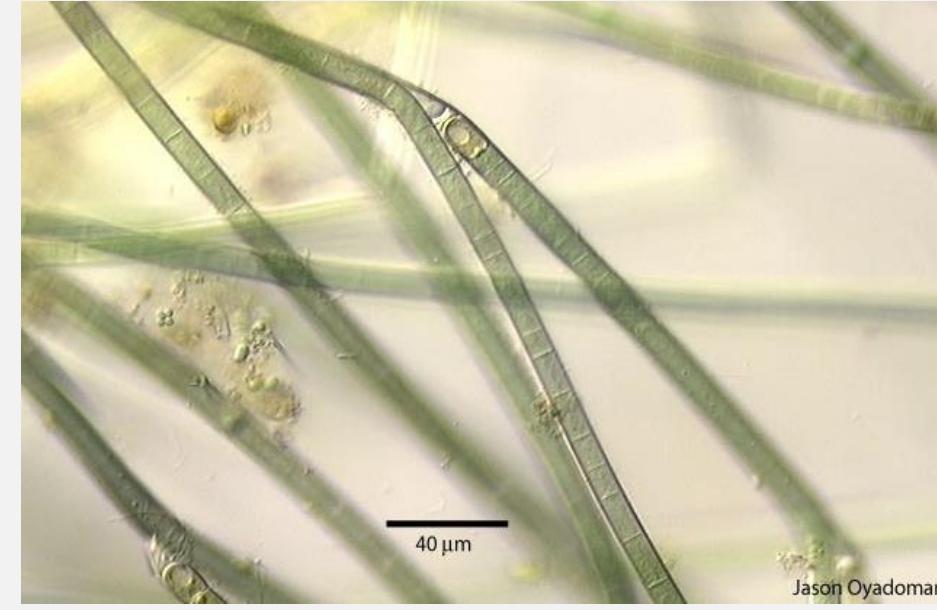




## FILAMENTI NON RAMIFICATI



## FILAMENTI CON RAMIFICAZIONI



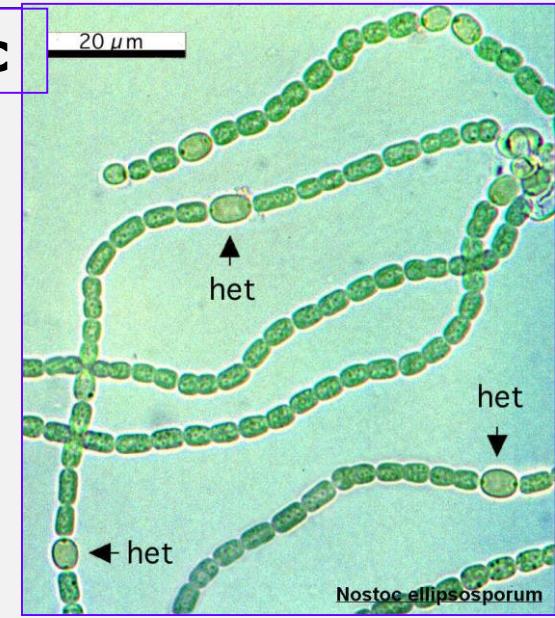
# FILAMENTI NON RAMIFICATI CON DIFFERENZIAMENTO

Cellule differenziate prive di fotosistema II in grado di ridurre l' $N_2$  molecolare atmosferico per l'azione dell'enzima **NITROGENASI**

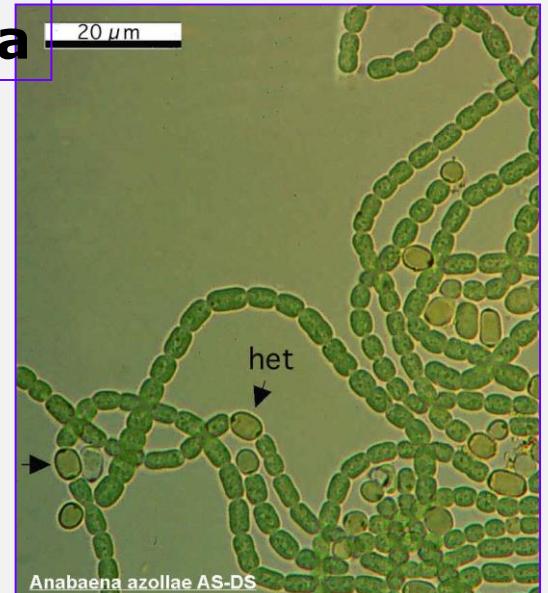


CON  
ETEROCISTI

**Nostoc**



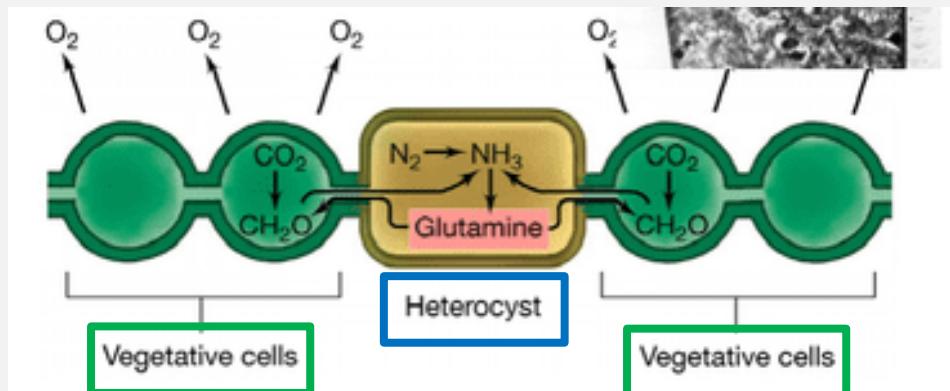
**Anabaena**



I cianobatteri più efficienti a fissare l' $N_2$  atmosferico sono quelli eterocistici dei generi **Nostoc** e **Anabaena**.

La riduzione dell'  $\text{N}_2$  richiede l'enzima **NITROGENASI** la cui sintesi avviene in assenza di composti azotati e funziona in assenza di  $\text{O}_2$ .

Gli azotofissatori, quindi, oltre a sintetizzare l'enzima Nitrogenasi hanno evoluto una serie di strategie per proteggere l'enzima dall'azione inibitrice dell' $\text{O}_2$ .



**Cellule vegetative:** fanno fotosintesi ossigenica

**Eterocisti:** fanno azotofissazione

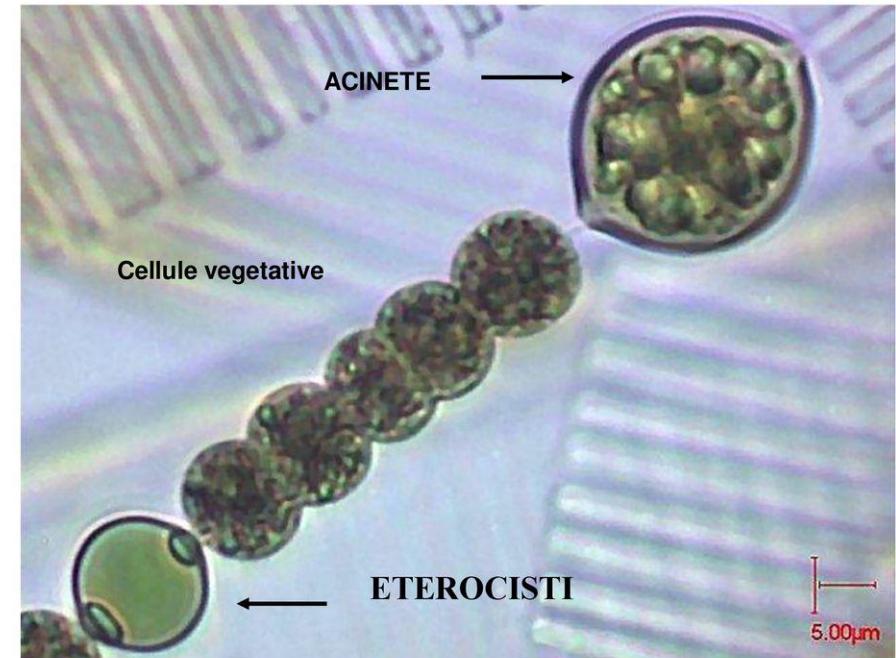


Presentano uno spesso involucro per limitare l'entrata di  $\text{O}_2$

Per questo loro metabolismo i Cianobatteri raggiungono il maggior grado di autonomia nel procurarsi quello che gli necessita per crescere e riprodursi.

Nelle forme filamentose, può avvenire la trasformazione di alcune cellule della colonia in strutture durevoli (spore) in grado di divenire quiescenti e resistere alle condizioni avverse, come la siccità.

Si tratta di spore, dette **ACINETI**, voluminose e ricche di sostanze di riserva, con parete fortemente ispessita e pluristratificata, in grado di sopravvivere in vita latente anche per moltissimi anni e di germinare, in condizioni idonee, riproducendo una nuova colonia.



## **LA CAPACITÀ DI MOLTI BATTERI DI FISSARE L'AZOTO ATMOSFERICO È IMPORTANTISSIMA DAL PUNTO DI VISTA ECOLOGICO**

Se nell'ambiente è presente ammonio le eterocisti non si formano, ma se l'azoto disponibile scarseggia, le eterocisti si sviluppano, fissano l'azoto e lo trasferiscono alle cellule vegetative vicine.



Importantissime sono le specie del genere *Trichodesmium* che vivono in mare aperto e sono in grado di procedere alla fissazione dell'azoto (senza eterocisti) e di arricchire gli oceani in zone altrimenti prive dello stesso

**La maggior parte delle specie vive libera, ma alcune formano associazioni simbiontiche con le piante o con i funghi (licheni).**

**Anabaena vive in simbiosi  
con Azolla e le radici di  
molte cycadine, Nostoc  
con epatiche, antocerote**



Pteridofita



Angiosperme

Gimnosperme



Diatomee



20µm

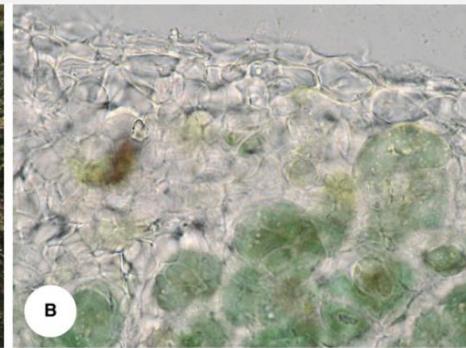
Rhopalodi  
a



Briofite



Nostoc e Rhizonema formano simbiosi  
licheniche con alcuni funghi



Diatomee



20µm

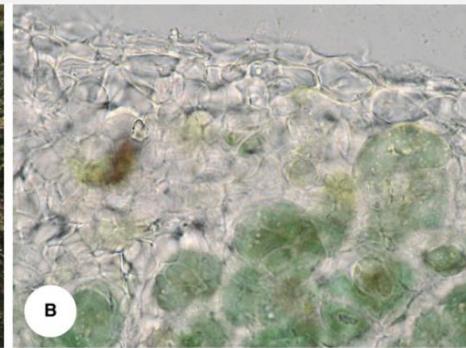
Rhopalodi  
a



Briofite



Nostoc e Rhizonema formano simbiosi  
licheniche con alcuni funghi





## **Prochlorophyta**

Sono un gruppo di Cianobatteri che presentano caratteristiche particolari:

- Presentano clorofilla a e b e carotenoidi
- Sono privi di ficobiline
- Le membrane fotosintetiche tendono ad appaiarsi come avviene nei cloroplasti di altri vegetali.

