

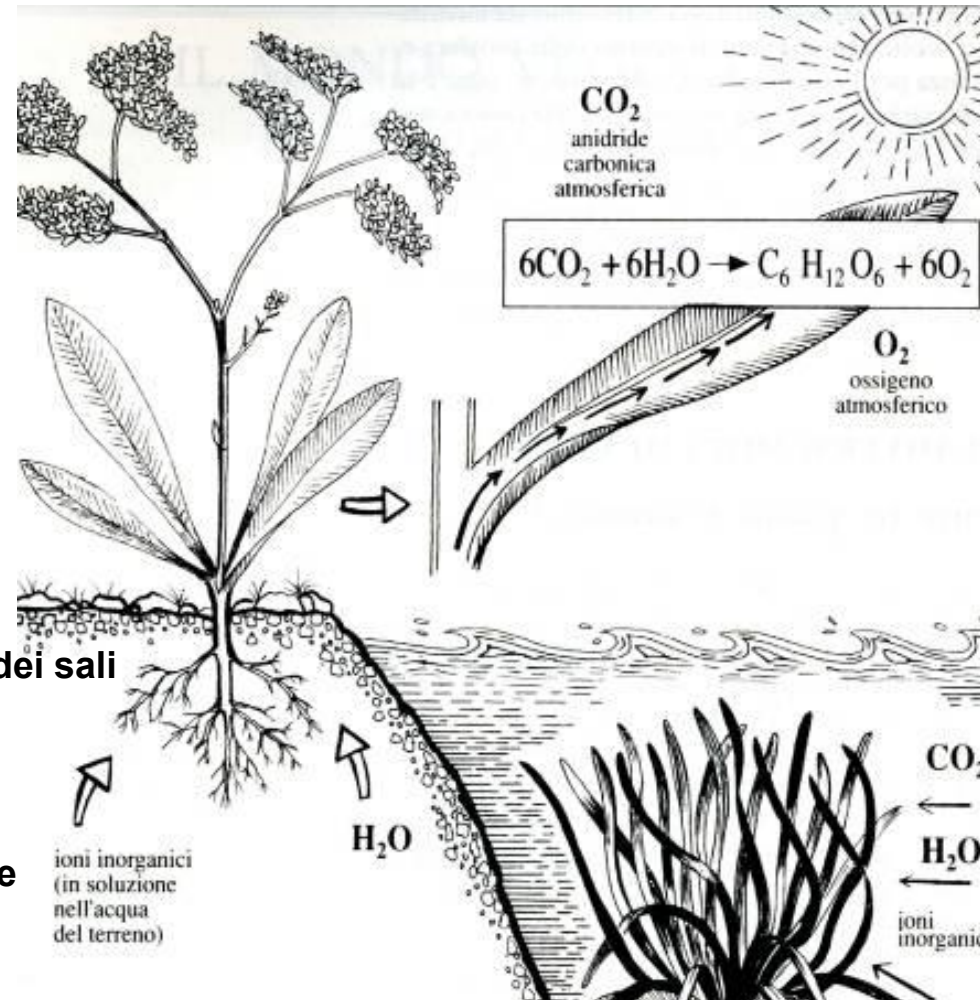
# Cenni di Fisiologia vegetale

## Obiettivi

- Scoprire il modo in cui i vegetali catturano l'energia e la utilizzano per accrescersi e riprodursi
- Conoscere i meccanismi di regolazione interna nelle piante
- Scoprire in che modo le piante rispondono agli stimoli esterni

## Contenuti

- ✓ La fotosintesi
- ✓ La respirazione cellulare
- ✓ L'assorbimento ed il trasporto dell'acqua e dei sali minerali
- ✓ Gli ormoni
- ✓ I movimenti delle piante e le risposte a luce e temperatura



# FOTOSINTESI CLOROFILLIANA

Uno dei principali elementi distintivi tra cellule animali e vegetali è la capacità di queste ultime di svolgere la fotosintesi clorofilliana, processo peraltro presente in tutti gli organismi fotoautotrofi.

La vita sulla Terra dipende fondamentalmente dall'energia solare. La Fotosintesi è l'unico processo biologicamente importante in grado di raccogliere tale energia

Il termine «fotosintesi» significa letteralmente : sintesi mediante la luce

La Fotosintesi è un processo che converte l'energia luminosa in energia chimica, attraverso una serie di reazioni che avvengono nei cloroplasti e che coinvolgono i pigmenti.

Gli organismi fotosintetici utilizzano l'energia solare per sintetizzare composti organici complessi



# FOTOSINTESI

↓  
LUCE

↓  
COSTRUZIONE,  
ASSEMBLAGGIO

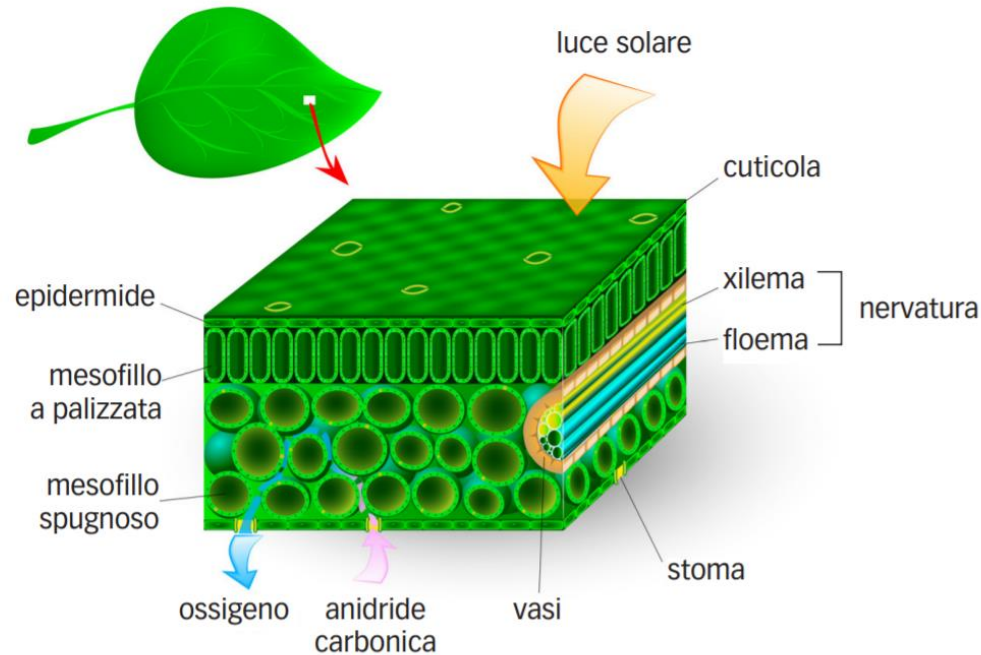
Energia  
Luminosa



Energia  
Chimica



Gli organismi fotoautotrofi sono in grado trasformare l'energia luminosa in energia chimica, immagazzinandola nella materia organica sintetizzata a partire da  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ ; a questo gruppo appartengono organismi eucarioti, come le piante e le alghe, e organismi procarioti, come i batteri fotosintetici. Nelle cellule eucariote tale processo avviene nei cloroplasti ad opera di importanti molecole cromofore (soprattutto clorofilla e carotenoidi), capaci di captare quanti di luce e di trasferire tale energia a particolari centri di raccolta, che daranno poi luogo a una serie di reazioni chimiche





L'energia luminosa permette la sintesi di carboidrati e la generazione di ossigeno dal biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>) e dall'acqua (H<sub>2</sub>O)



Biossido di  
carbonio

Acqua

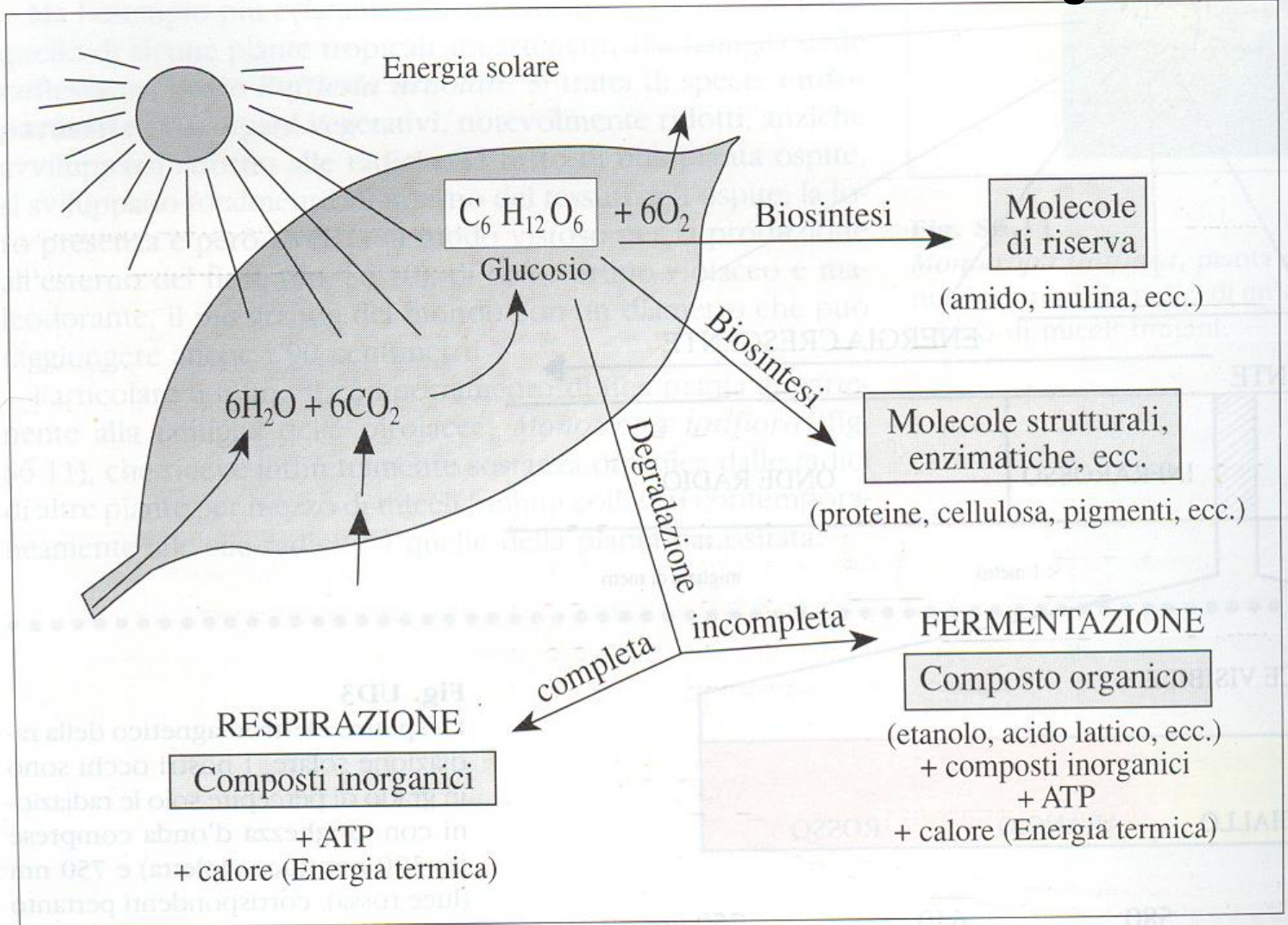
Carboidrato

Ossigeno

L'energia accumulata in queste molecole viene poi usata per dare energia ai processi cellulari vegetali e rappresenta la fonte di energia di tutte le forme di viventi.

- Ruolo della luce
- Ruolo dei pigmenti
- Reazioni fotosintetiche

# Vie di utilizzazione del glucosio



Appartiene alle metallo-porfirine

La clorofilla b sarebbe una forma ossidata della clorofilla a

Anello tetrapirrolico

Gr. metilico

Gr. aldeidico

PORZIONE IDROFILA

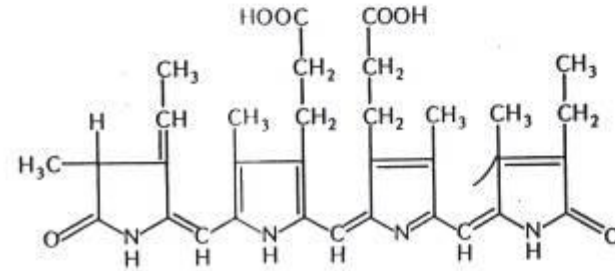
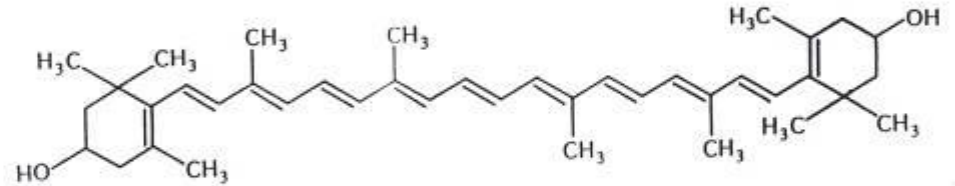
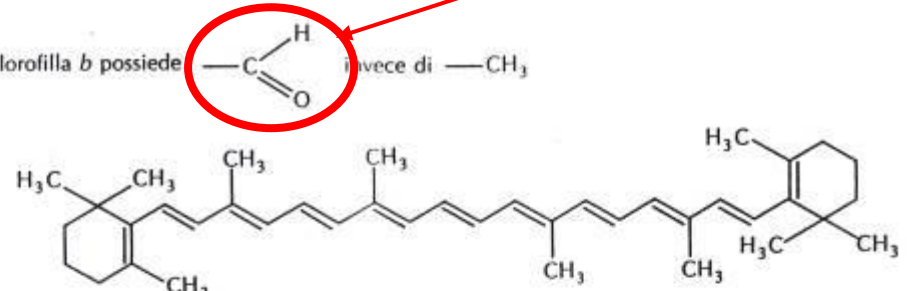
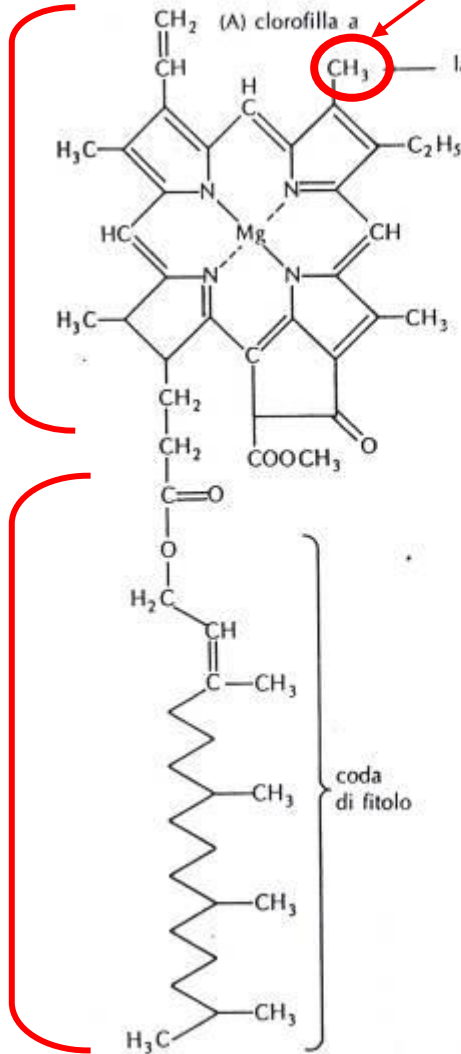
NUCLEO PORFIRINICO (10 Å)

Magnesio

PORZIONE LIPOFILA

ALCOOL DI 20 ATOMI DI CARBONIO

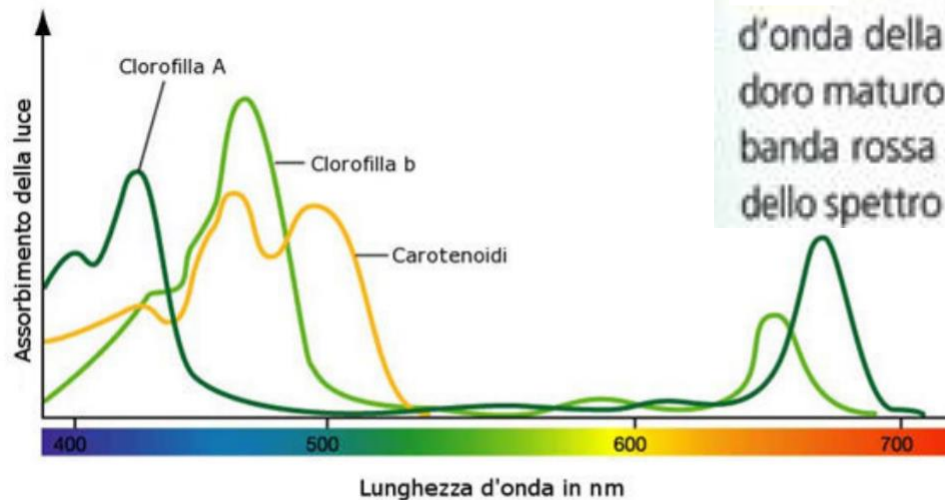
Fitolo idrofobo



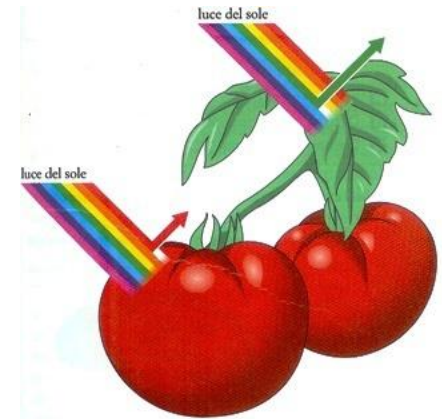
la clorofilla b possiede  $\text{—C(=O)H}$  invece di  $\text{—CH}_3$

coda di fitolo

Tutte le **clorofille** hanno una complessa struttura ad anello che è chimicamente imparentata con i gruppi simili alla porfirina che si trovano nell'emoglobina. Attaccata alla struttura ad anello vi è quasi sempre una lunga catena idrocarburica. La struttura ad anello contiene alcuni elettroni legati debolmente ed è la parte della molecola coinvolta nella transizione elettronica. Altri pigmenti importanti per il processo fotosintetico presenti nei cloroplasti sono i **carotenoidi**, hanno molecole lineari; l'energia luminosa da loro assorbita è trasferita alle clorofille per la fotosintesi e per questo motivo sono definiti pigmenti accessori.

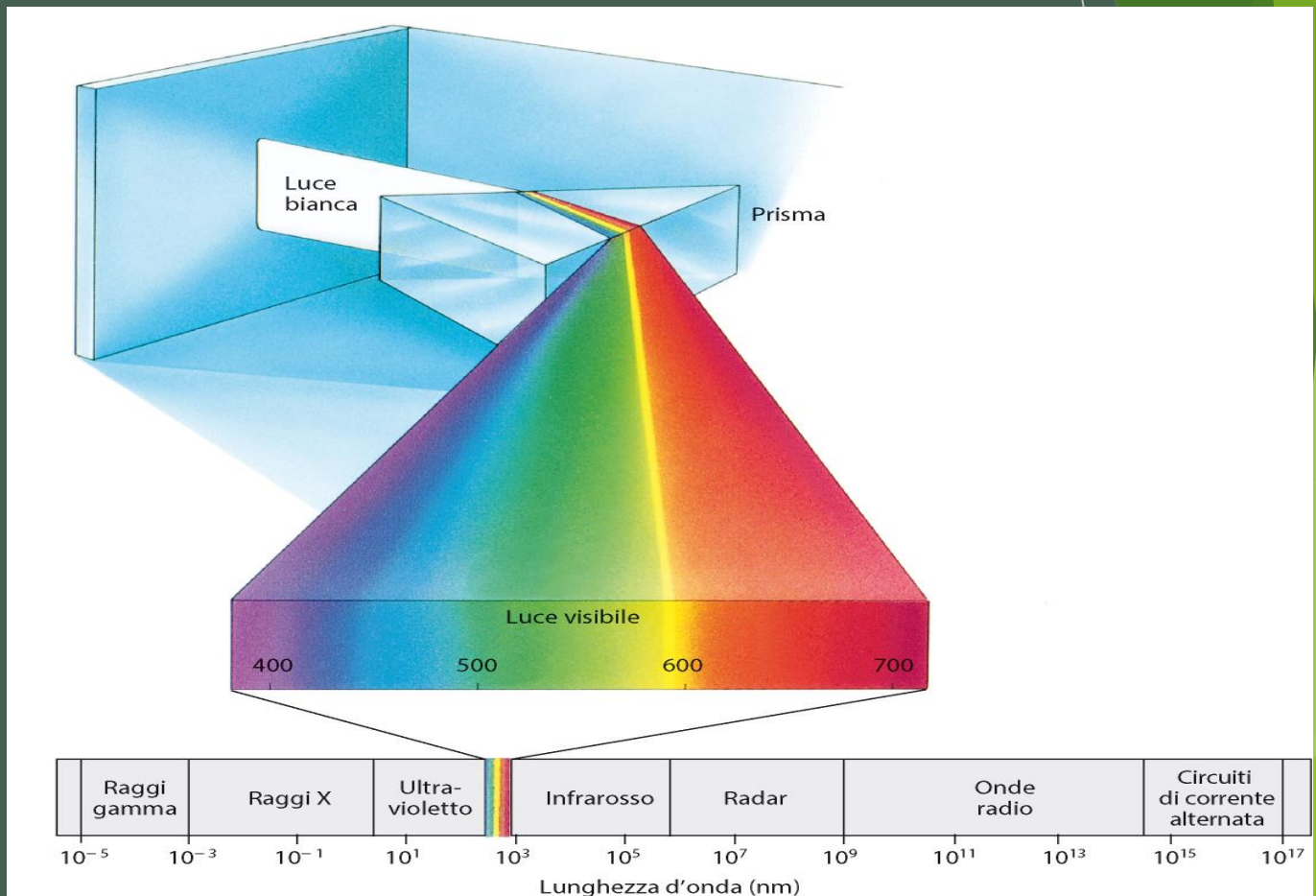


I colori che percepiamo corrispondono alle lunghezze d'onda della luce che vengono riflesse; per esempio, un pomodoro maturo risulta di colore rosso in quanto riflette la luce della banda rossa dello spettro, mentre la luce di tutte le altre bande dello spettro visibile viene assorbita.





È possibile misurare la percentuale di luce di ciascuna lunghezza d'onda assorbita da un pigmento. Alle tre curve corrispondono modelli di assorbimento dei principali pigmenti che si trovano nei cloroplasti: clorofilla a, clorofilla b, carotenoidi

# La luce



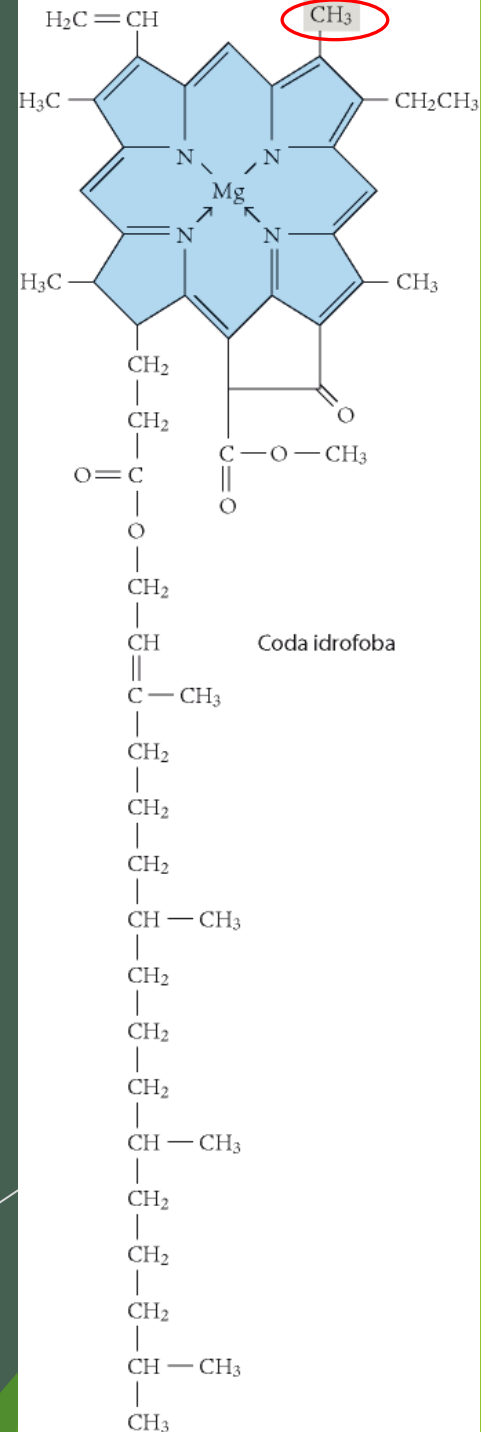
## Tabella 7.1 Principali caratteristiche dei pigmenti fotosintetici

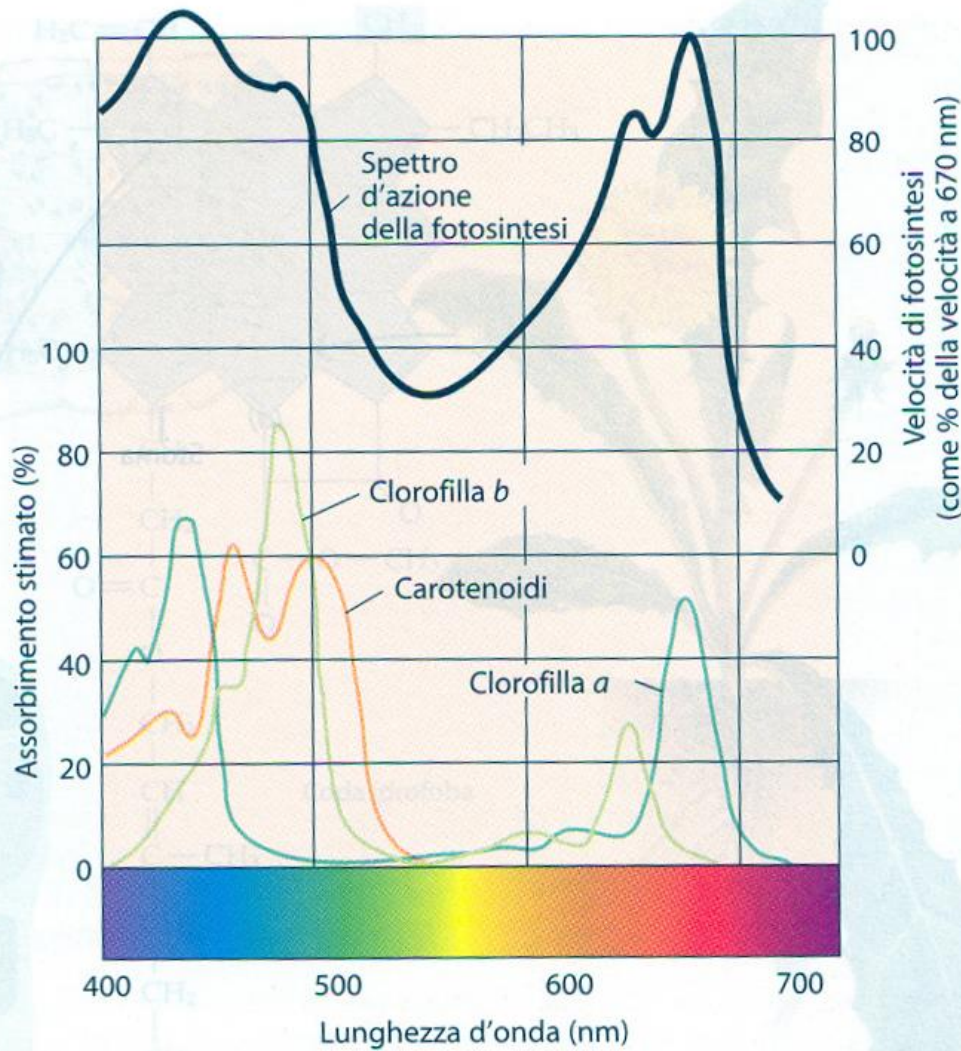
Classe di pigmenti	Pigmento	Colore	Localizzazione
<b>Clorofille</b> 	clorofilla <i>a</i>	verde erba	tutti gli organismi fotosintetizzanti eucariotici; cianobatteri
	clorofilla <i>b</i>	verde oliva	piante; alghe verdi
	clorofilla <i>c</i>	verde giallo	alghe brune; diatomee; ecc.
	batterio-clorofilla	blu	solfo batteri rossi
<b>Carotenoidi</b> 	caroteni	da giallo a rosso	tutte le cellule fotosintetizzanti
	xantofille	da giallo a rosso	la maggior parte delle cellule fotosintetizzanti
<b>Ficobiline</b>	ficocianina	blu	cianobatteri; alghe rosse
	ficoeritrina	rosso	cianobatteri; alghe rosse
	alloficocianina	blu	cianobatteri; alghe rosse



# CLOROFILLA

- ❖ **a:** FONDAMENTALE, circa i  $\frac{3}{4}$  delle clorofille totali; in tutti gli eucarioti fotosintetici e cianobatteri
- ❖ **b:** ACCESSORIO = serve ad ampliare l'intervallo di luce; assorbe la luce e la trasferisce alla a (presente in piante, alghe verdi e alghe euglenoidi)
- ❖ **c:** sostituisce la b in alcune alghe (brune, diatomee)





**Figura 7.6** Spettro d'azione della fotosintesi (curva superiore) e spettro di assorbimento della clorofilla *a*, della clorofilla *b* e dei carotenoidi (curve inferiori) in un cloroplasto. Si noti la connessione tra lo spettro d'azione della fotosintesi e gli spettri di assorbimento della clorofilla *a*, della clorofilla *b* e dei carotenoidi i quali tutti assorbono la luce che è utilizzata nella fotosintesi.

Clorofilla *a* : 2 massimi a 420 e 630

Pigmenti accessori ampliano lo spettro di assorbimento e la quantità di luce che può essere utilizzata

La **clorofilla a** costituisce il principale pigmento fotosintetico e costituisce il nucleo del centro di reazione

Lo spettro di assorbimento della clorofilla **a** coincide con la massima velocità di fotosintesi

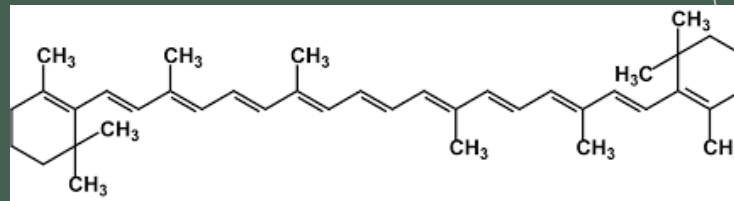
# CAROTENOIDI

- Pigmenti accessori
- Antiossidanti

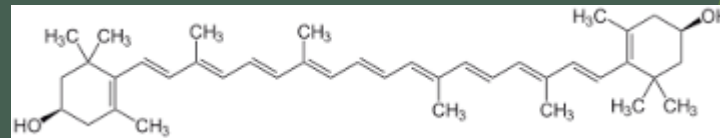
- 2 gruppi

caroteni

xantofille



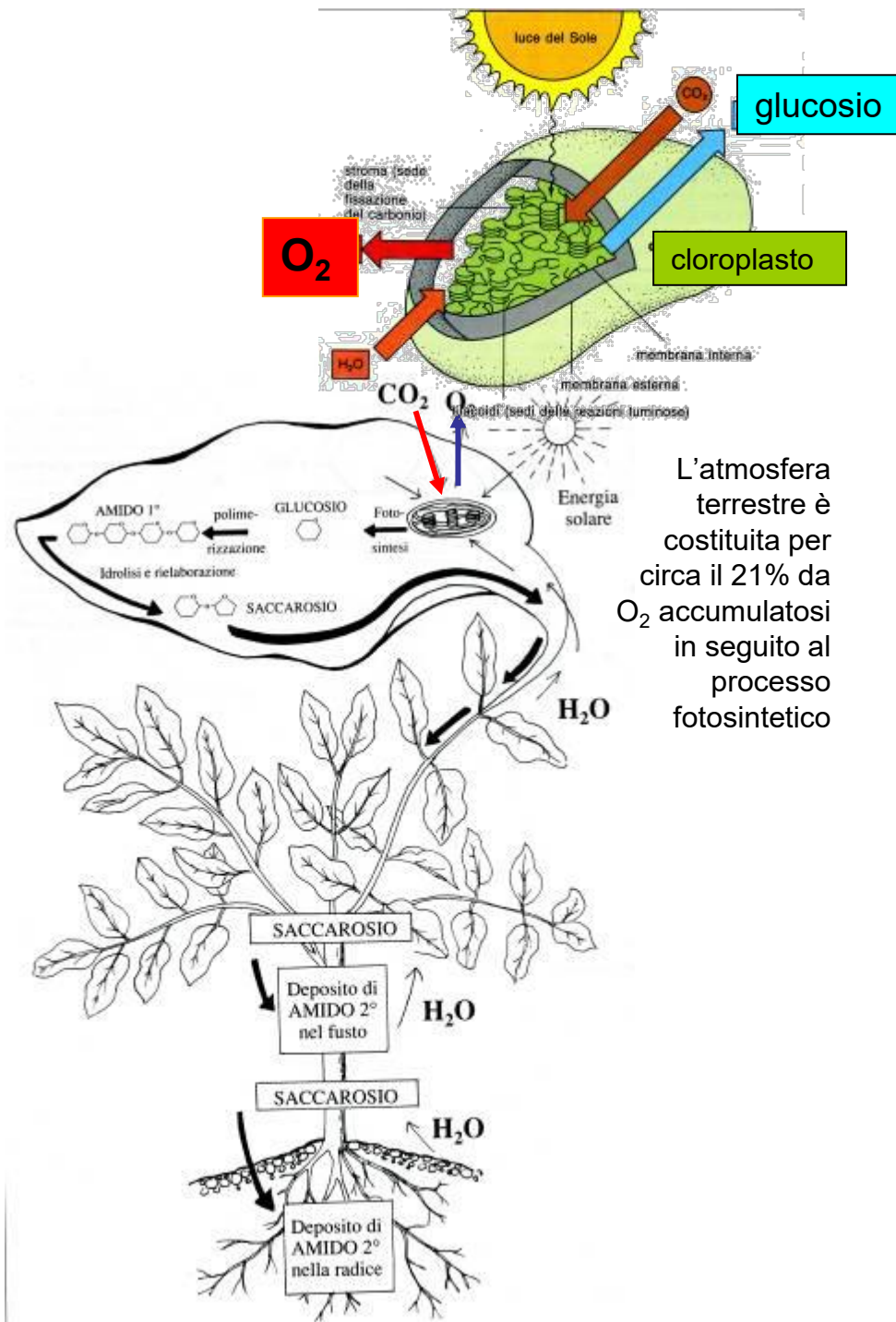
$\beta$  carotene



zeaxantina

- cianobatteri e cloroplasti alghe rosse

FICOBILINE



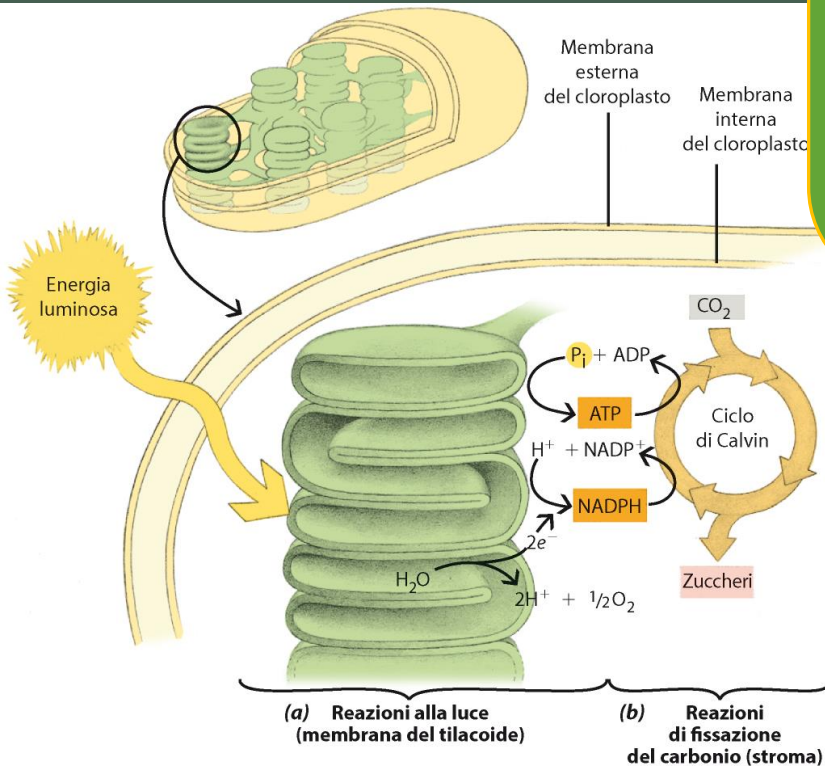
L'atmosfera terrestre è costituita per circa il 21% da O<sub>2</sub> accumulatosi in seguito al processo fotosintetico

Possiamo distinguere una fase luminosa, che si svolge quando la luce colpisce i pigmenti fotosintetici, e una fase chimica indipendente dalla luce, in cui si innescano reazioni di ossidoriduzione, che portano alla sintesi di molecole organiche (glucosio).

## FASE LUMINOSA (fotochimica)

Sulle membrane dei tilacoidi

- luce dipendente
- prodotti ATP e agenti riducenti
- liberato O<sub>2</sub>



## FASE OSCURA (chimica)

Nello stroma

- luce indipendente
- utilizzati ATP e agenti riducenti
- CO<sub>2</sub> organicata a zuccheri

# Fase luminosa

La captazione della luce avviene a livello delle membrane tilacoidali dei cloroplasti, dove sono localizzati i pigmenti fotosintetici organizzati in due fotosistemi, ognuno con un centro di reazione, che ha il compito di raccogliere l'energia radiante catturata dalle altre molecole cromofore.

Quindi ogni pigmento capta la luce come un'antenna e trasferisce l'energia alle molecole vicine fino a che questa non giunge al centro di reazione, costituito da clorofille (**clorofilla a**), indicate con P 680 nel fotosistema II e P 700 nel fotosistema I, in relazione alla lunghezza d'onda maggiormente assorbita.

Il centro di reazione P 680, raggiunto lo stato eccitato, torna al suo stato fondamentale cedendo elettroni a uno specifico accettore, che attraverso una complessa catena di trasportatori (citocromi e plastochinoni), giungono al fotosistema I; il centro di reazione P 700 li raccoglie e li convoglia a una proteina, la ferredoxina, che ossidandosi li cede al NADP<sup>+</sup> producendo NADPH.

Il centro di reazione del fotosistema II riacquista l'elettrone perso attraverso la reazione di scissione dell'acqua in ossigeno e idrogeno

e la ionizzazione di quest'ultimo in H<sup>+</sup> ed elettroni:  $2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 4\text{H}^+ + \text{O}_2 + 4\text{e}^-$

# Fase luminosa

Prodotti → ATP e NADPH

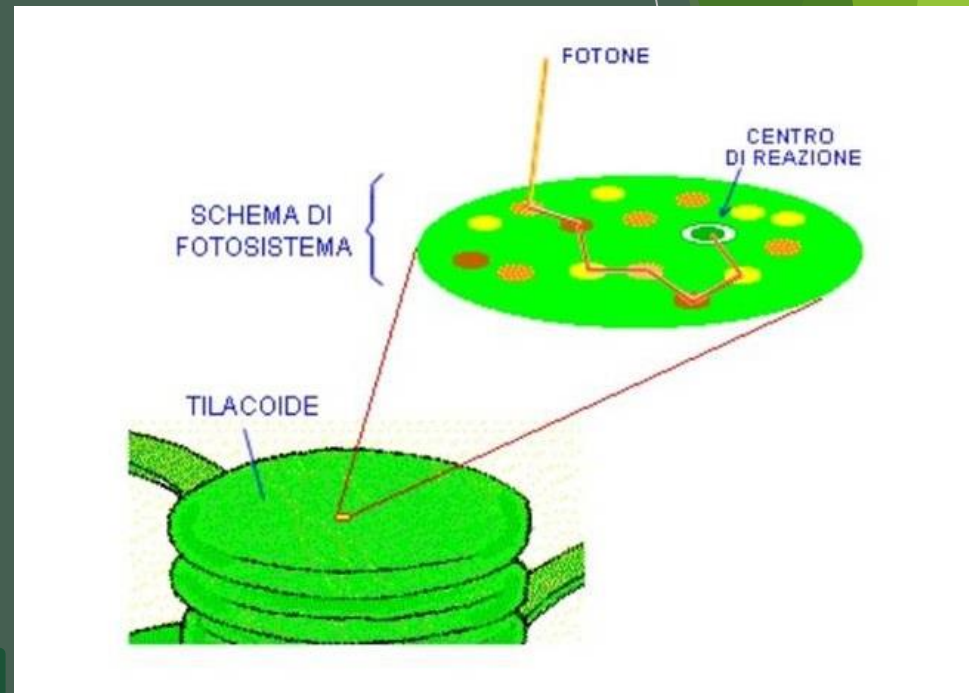
## 2 FOTOSISTEMI

Complesso di pigmenti  
incluso nella membrana  
dei tilacoidi



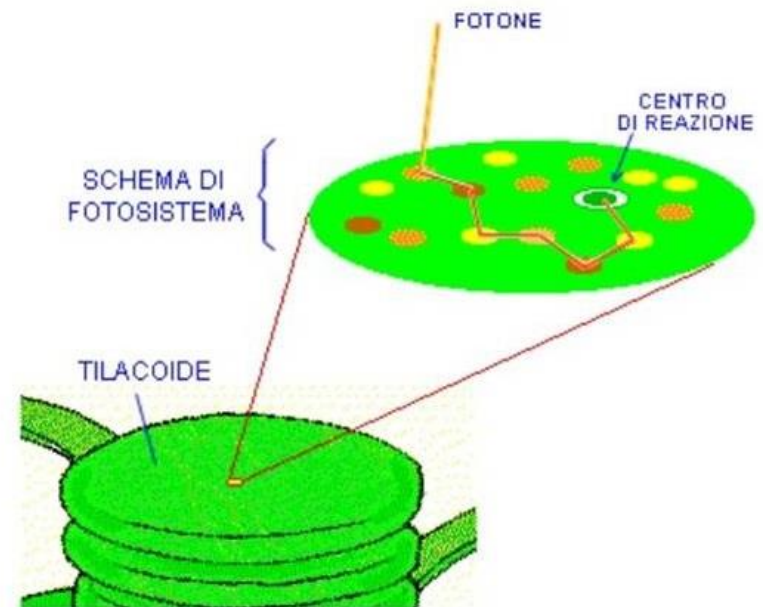
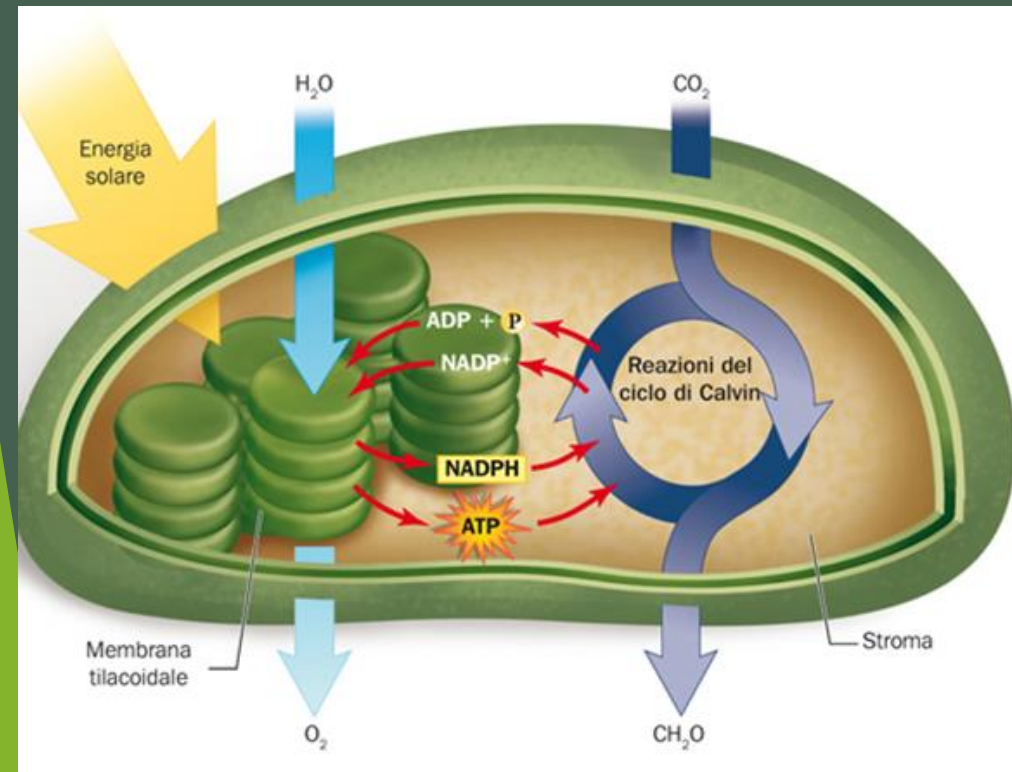
Complesso  
antenna

Centro di  
reazione



# Le molecole dei pigmenti sono immerse nei tilacoidi in unità chiamate fotosistemi

Ogni fotosistema contiene 250-400 molecole di pigmenti



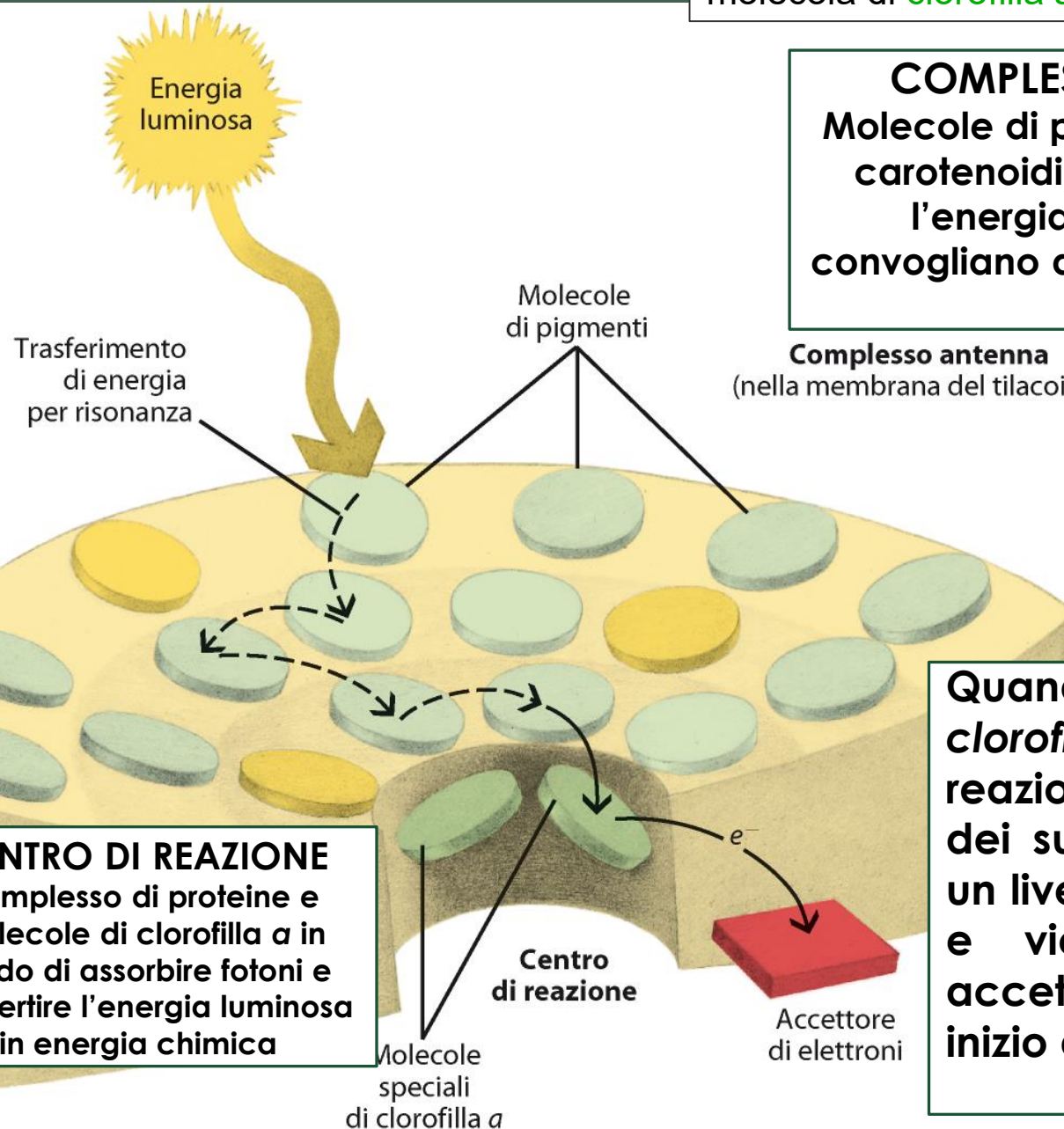
# Il fotosistema

I pigmenti fotosintetici sono riuniti a formare dei **FOTOSISTEMI** al centro dei quali c'è una molecola di **clorofilla a**

**COMPLESSO ANTENNA**  
Molecole di pigmento (clorofille, carotenoidi) che raccolgono l'energia luminosa e la convogliano al centro di reazione

**Complesso antenna**  
(nella membrana del tilacoide)

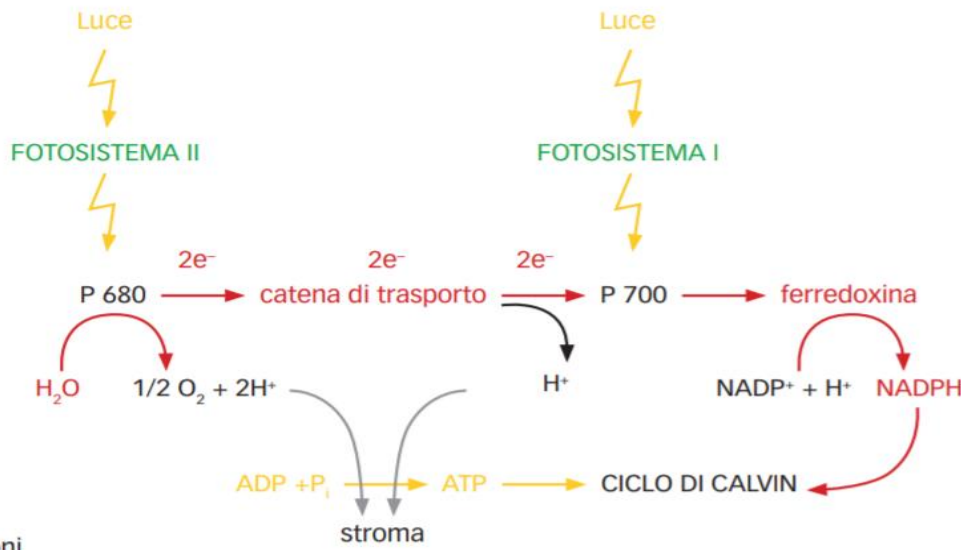
Quando una molecola di **clorofilla a** del centro di reazione assorbe energia, uno dei suoi elettroni è spinto ad un livello energetico superiore e viene trasferito ad un **accettore di elettroni**, dando **inizio al flusso elettronico**



**CENTRO DI REAZIONE**  
Complesso di proteine e molecole di clorofilla a in grado di assorbire fotoni e convertire l'energia luminosa in energia chimica

# Nella fase luminosa sono coinvolti 2 fotosistemi

Il flusso di elettroni dal fotosistema II al fotosistema I, lungo la catena di trasporto, insieme alla fotolisi dell'acqua genera un gradiente di concentrazione di  $H^+$  tra il lume dei tilacoidi e lo stroma del cloroplasto, che viene sfruttato per la produzione di ATP (chemiosmosi). In sintesi durante la fase luminosa, attraverso l'assorbimento dell'energia solare e la fotolisi dell'acqua, si ha la produzione di ATP e NADPH, che verranno poi sfruttati nella fase successiva per la sintesi di composti organici. L'emissione di  $O_2$  per scissione dell'acqua è per gli organismi fotoautotrofi un effetto secondario, ma non lo è certo per tutti gli organismi aerobi, che necessitano di questo elemento per vivere.



— flusso di elettroni  
— flusso di energia (luminosa e chimica)

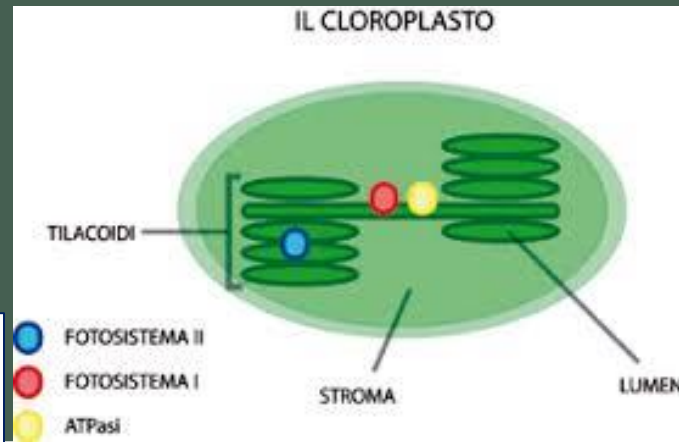


# Nella fase luminosa sono coinvolti 2 fotosistemi

## Fotosistema I

Clorofilla **a** del  
centro di  
reazione P700

P700 = clorofilla a che  
ha il picco max di  
assorbimento a 700 nm

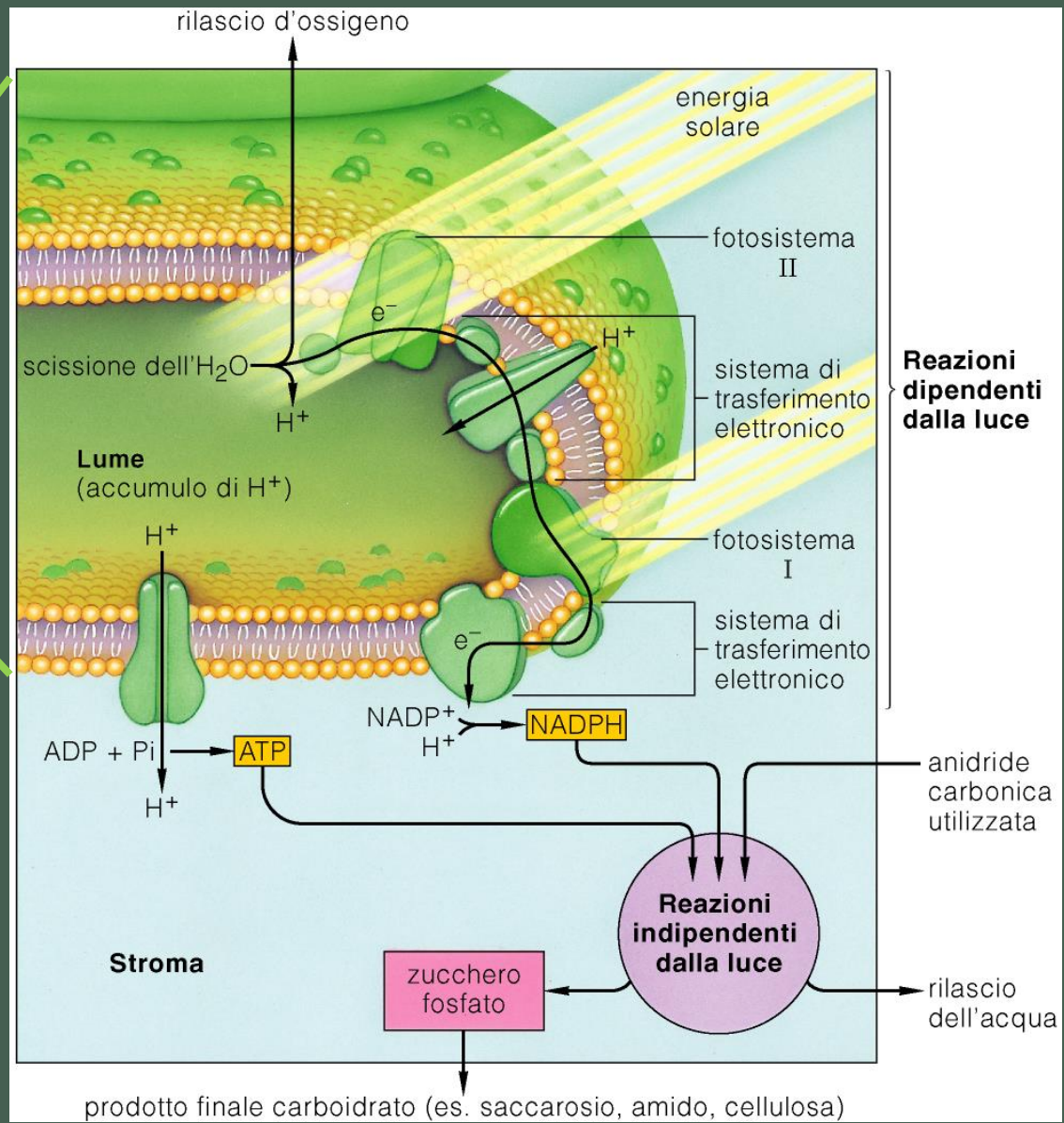
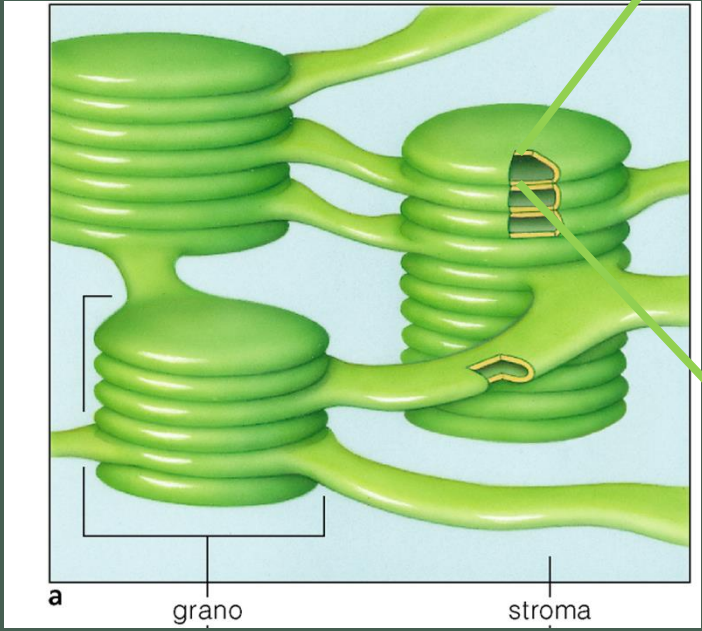


## Fotosistema II

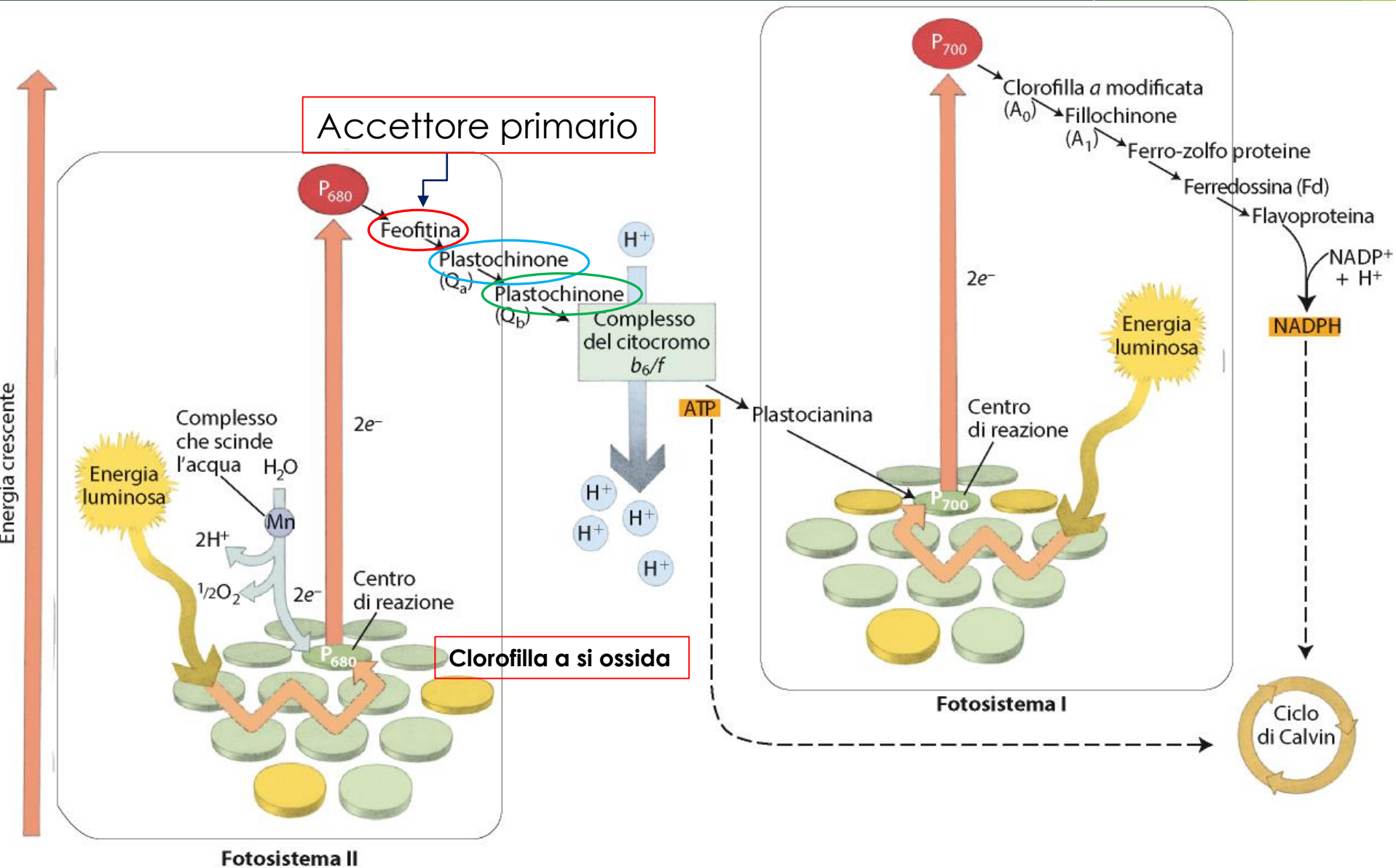
Clorofilla **a** del  
centro di  
reazione P680

680 = clorofilla a che  
ha il picco max di  
assorbimento a 680 nm

I due fotosistemi sono legati insieme mediante una  
**catena di trasporto degli elettroni** e funzionano  
simultaneamente e in modo coordinato.



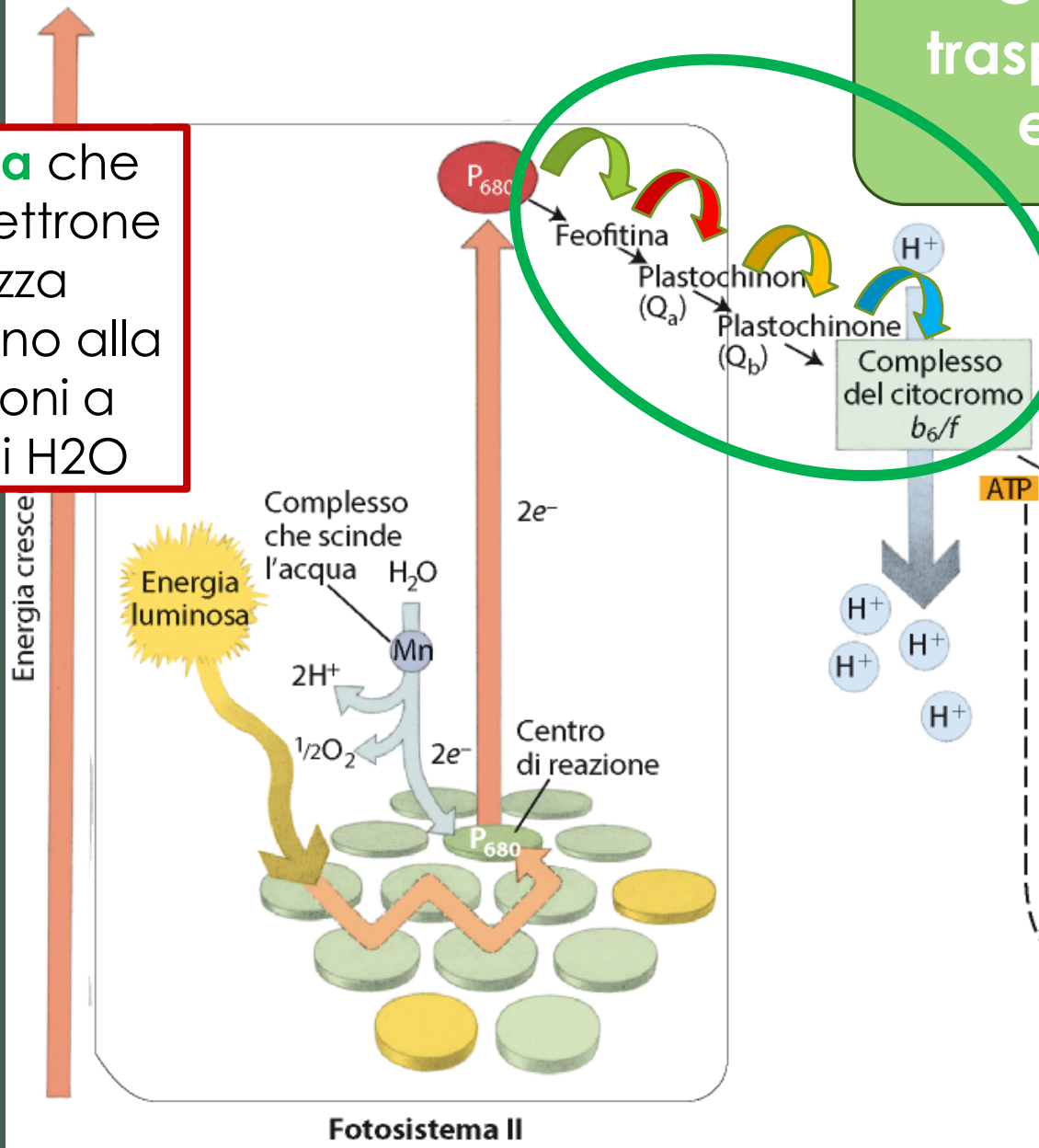
# Lo schema a Z



Trasferimento di elettroni a partire dall'acqua al NADP<sup>+</sup>

La clorofilla **a** che ha perso l'elettrone lo rimpiazza sottraendo uno alla volta elettroni a molecole di H<sub>2</sub>O

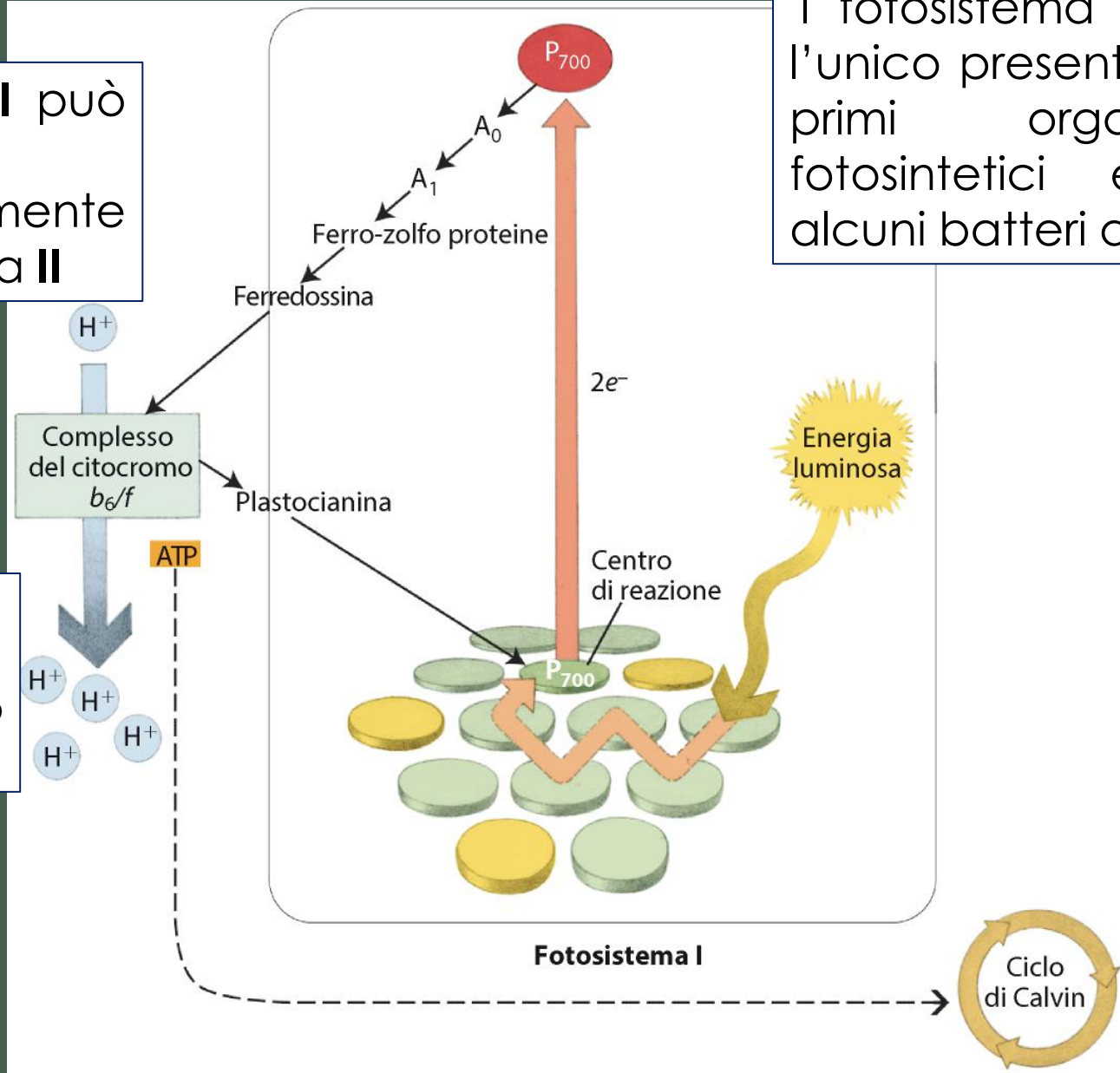
# Catena di trasporto degli elettroni



Il fotosistema I può funzionare indipendentemente dal Fotosistema II

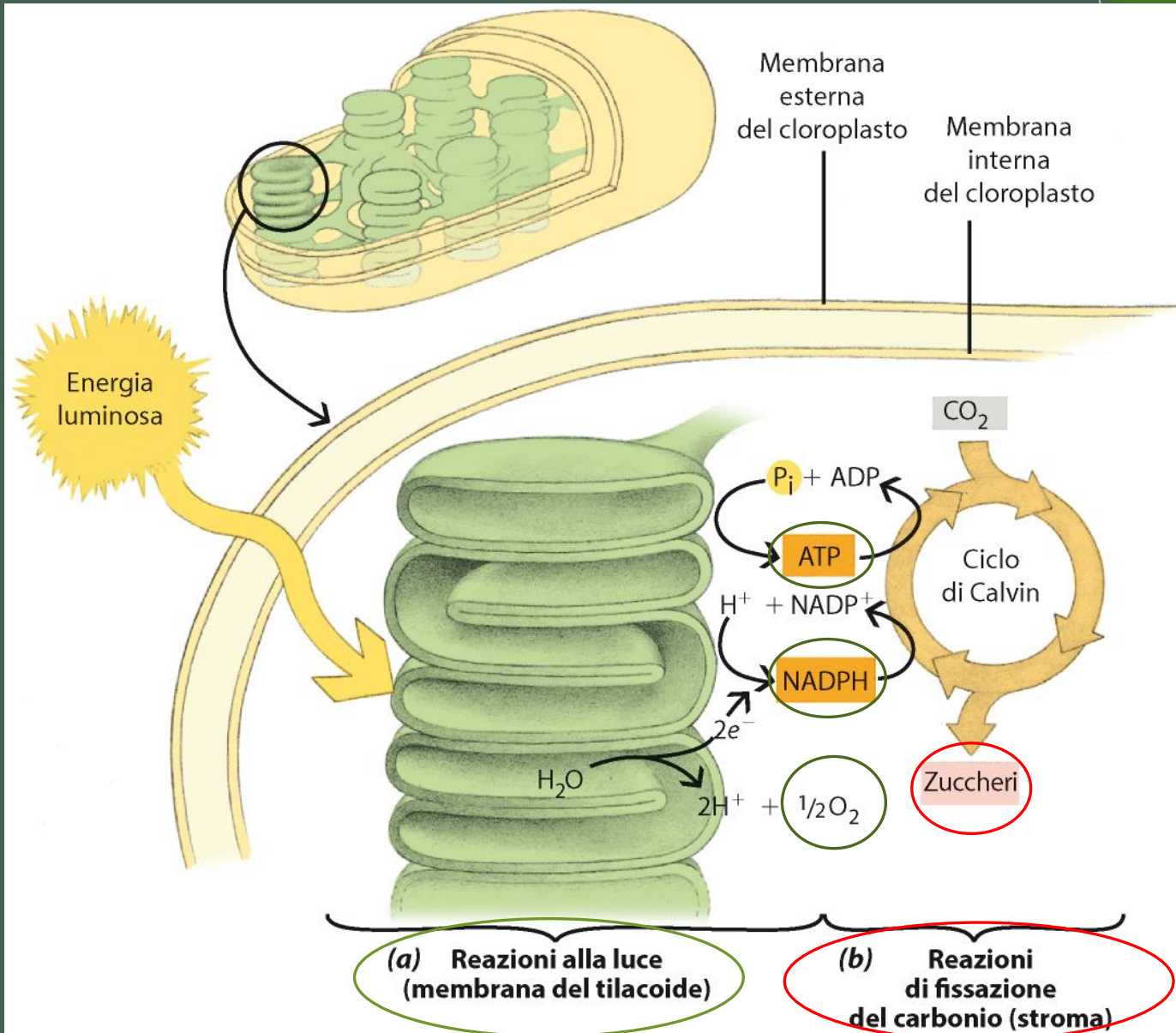
Nella fotofosforilazione ciclica l'unico prodotto è l'ATP

Il fotosistema I era l'unico presente nei primi organismi fotosintetici e in alcuni batteri attuali

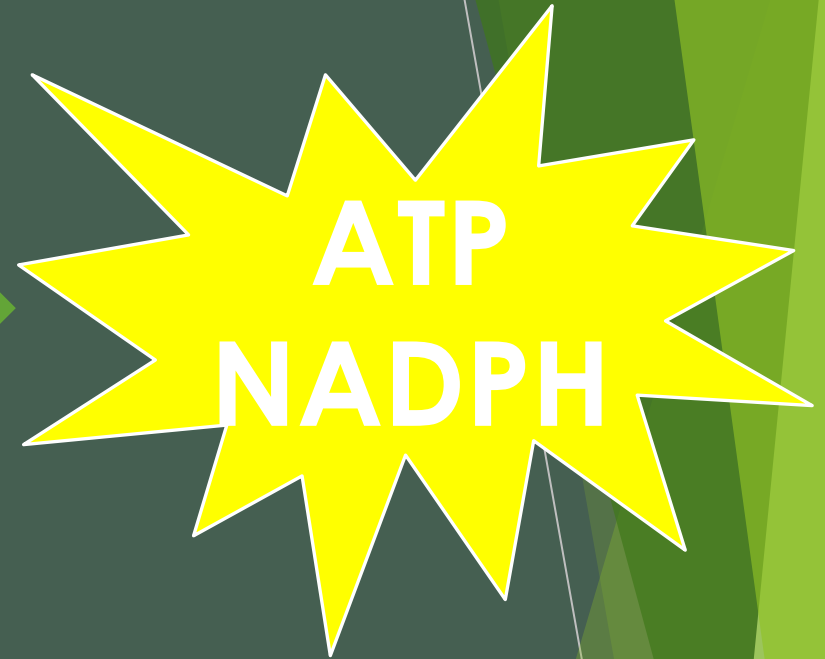
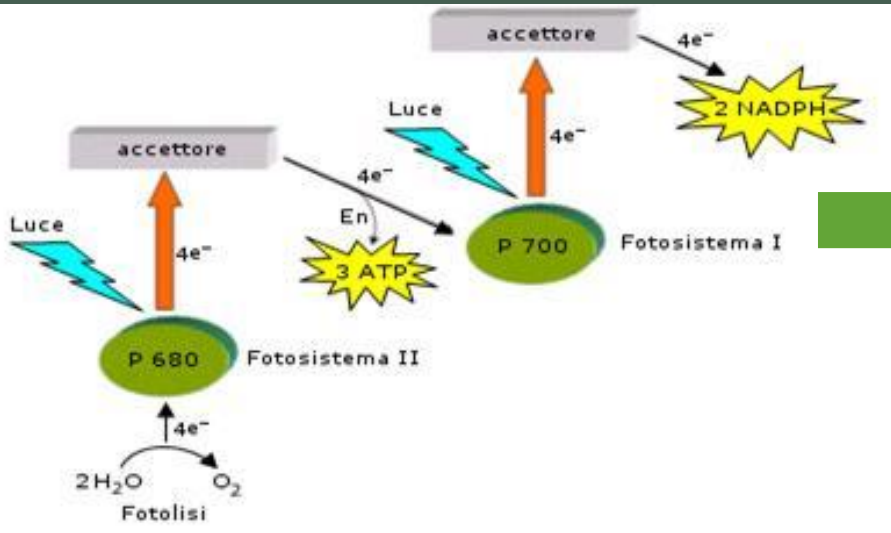


**Flusso ciclico di elettroni – fotofosforilazione ciclica**

# Le reazioni della fotosintesi



# Fase oscura (luce indipendente)

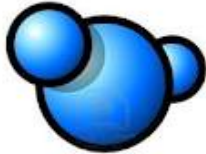


Utilizzati per fissare e ridurre il carbonio e per sintetizzare zuccheri semplici

**CARBONIO**

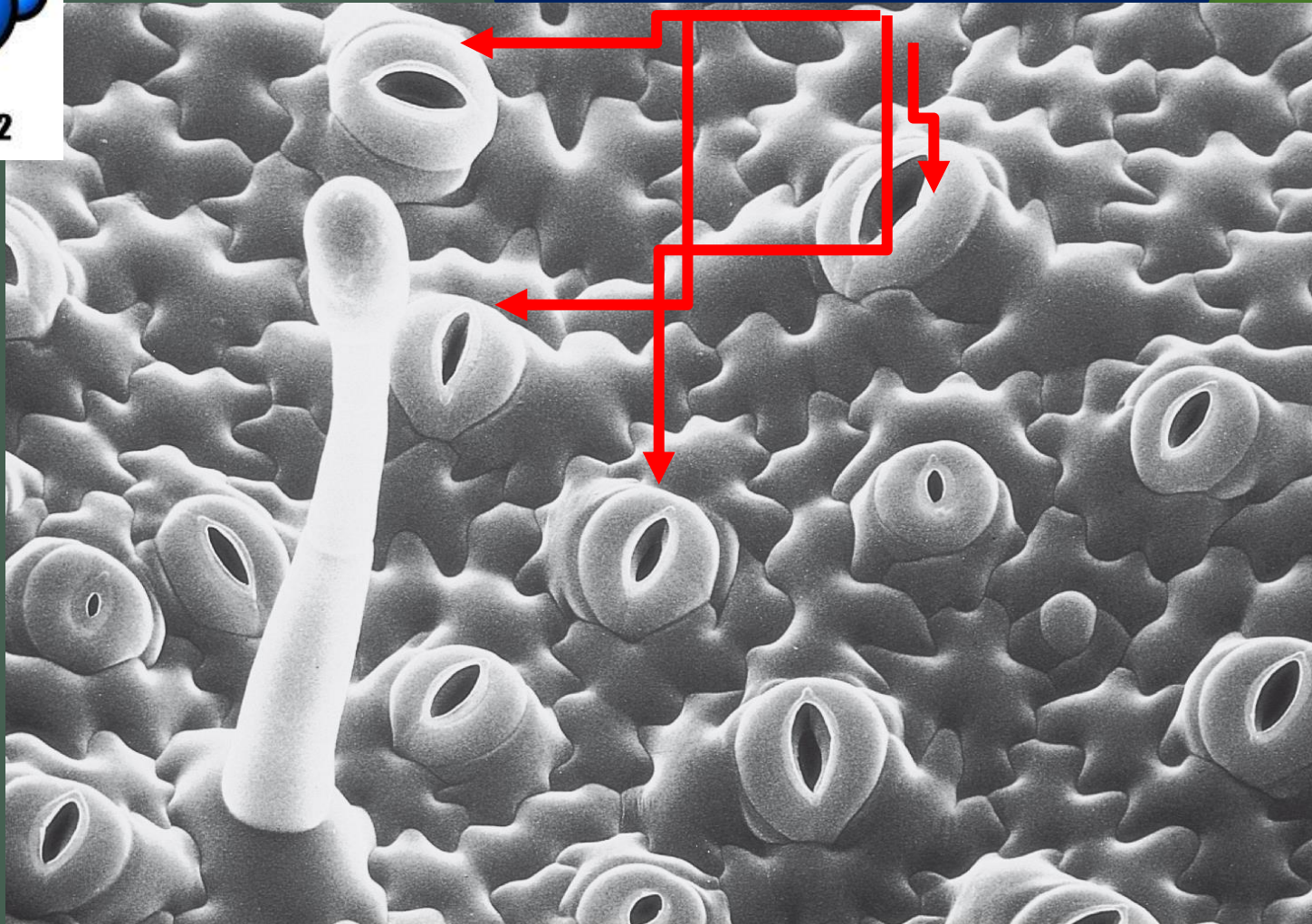


**Raggiunge le cellule  
fotosintetiche passando  
attraverso gli stomi**



**CO<sub>2</sub>**

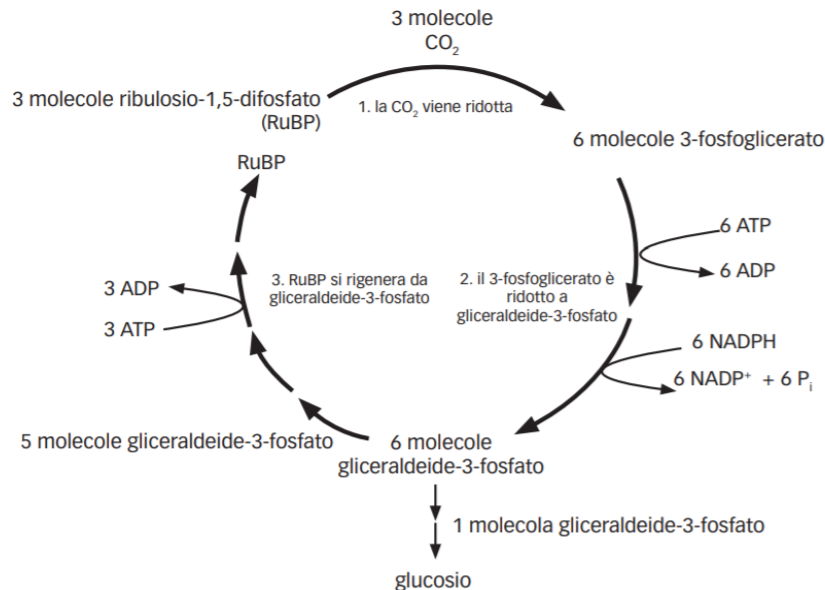
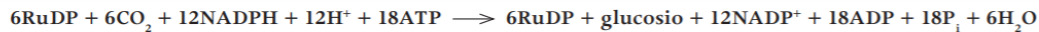
© 2000 K2K.com

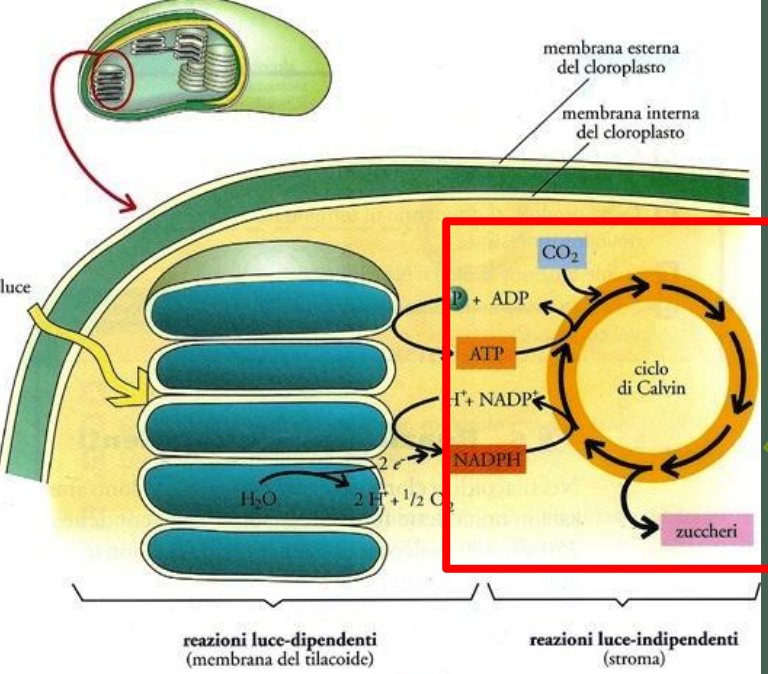


60 μm

# Fase oscura o chimica

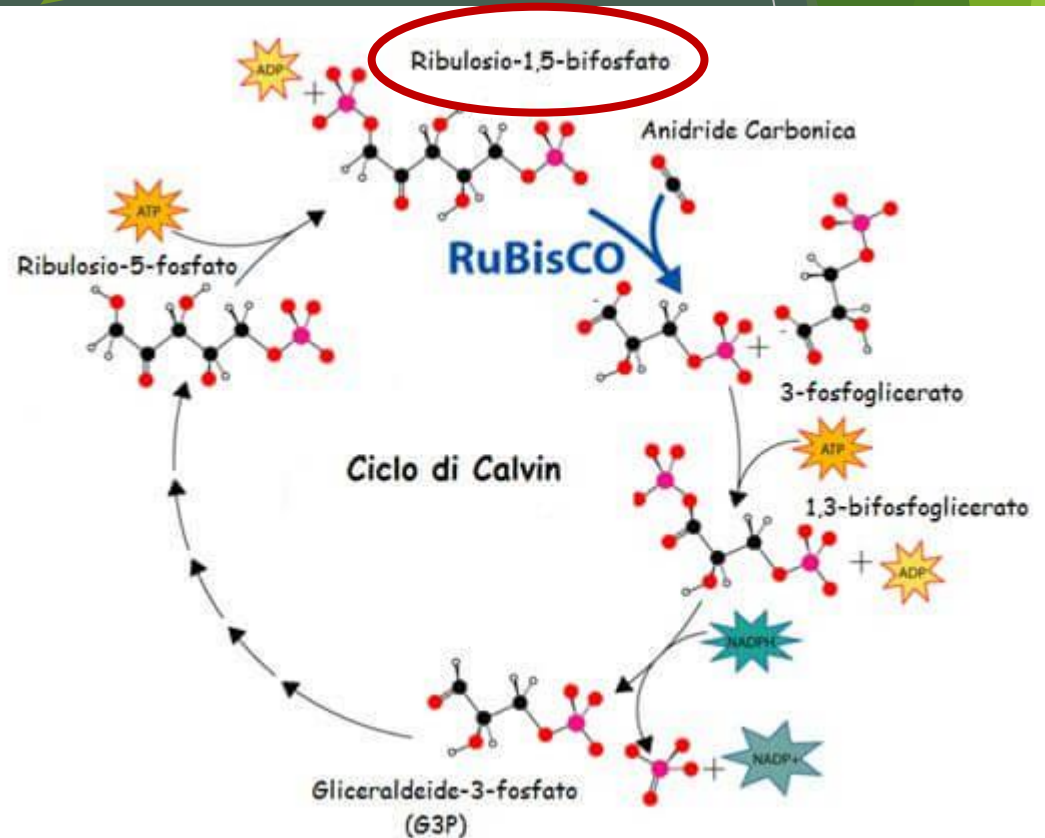
Le molecole di ATP e NADPH prodotte nella fase luminosa vengono utilizzate nella fase successiva, indipendente dalla luce, per la riduzione della  $\text{CO}_2$  a carbonio organico, attraverso il ciclo di Calvin (o ciclo  $\text{C}_3$ ). In questa complessa sequenza di reazioni la fissazione dell'anidride carbonica avviene ad opera del ribulosio-1,5-difosfato (Rubisco), che, dopo una serie di reazioni, viene ciclicamente rigenerato liberando una molecola di gliceraldeide-3-fosfato; quest'ultima darà poi il via alla sintesi di altre molecole organiche, tra cui il glucosio. Per ottenere una molecola di gliceraldeide-3-fosfato (3C) sono necessari tre cicli completi, mentre ne servono sei per la sintesi di glucosio (6C).





# Ciclo di Calvin

Rigenerazione del composto di partenza

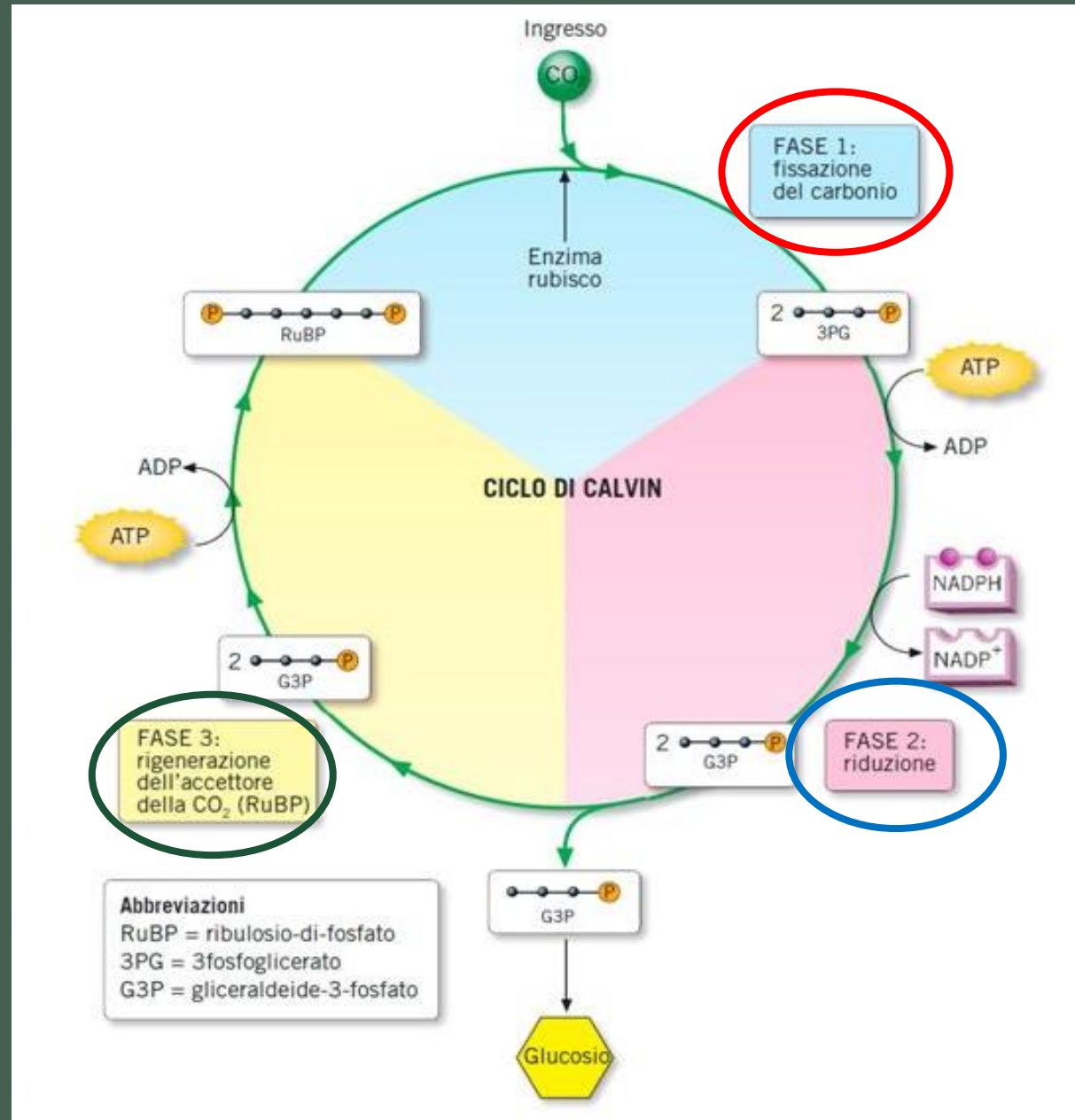


# Il ciclo di Calvin → 3 fasi principali

- **Carbossilazione**  
(molecola accettore a 5 atomi di C : RUBISCO = Ribuloso-bisfosfato carbossilasi)

- **Riduzione**  
(3PG ridotto a carboidrati a 3 atomi di C: gliceraldeide 3-fosfato)

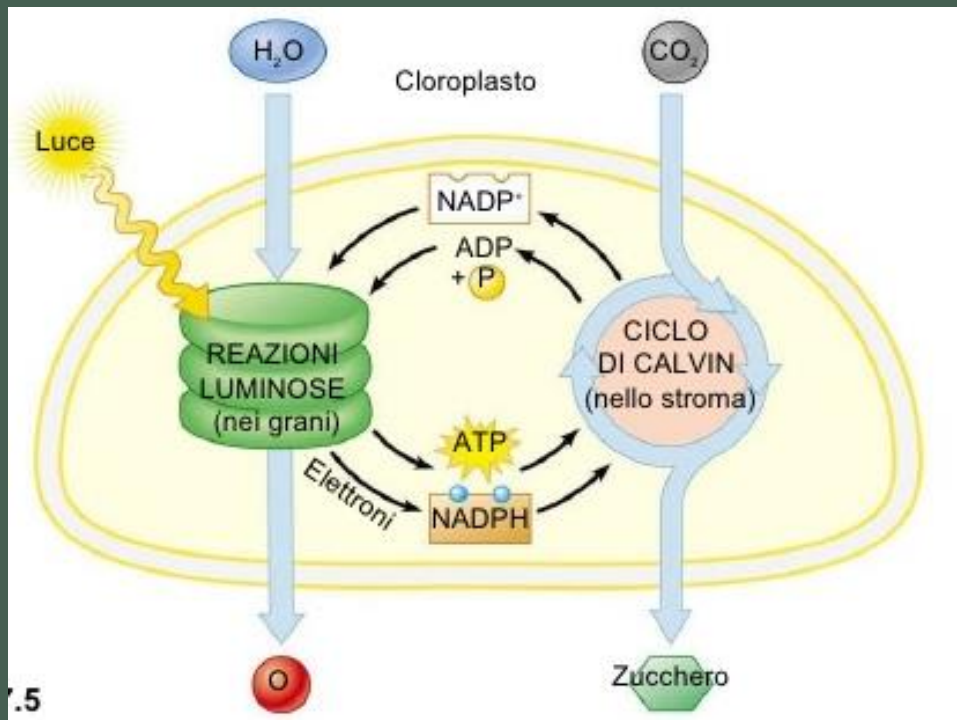
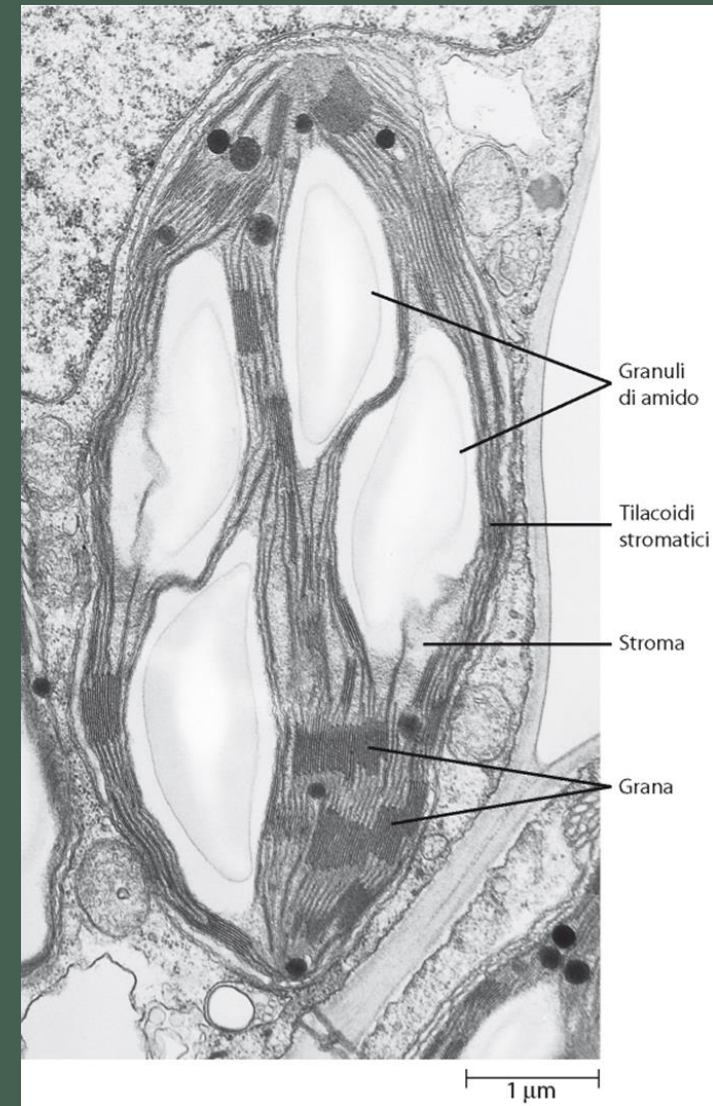
- **Rigenerazione**



La gran parte della **gliceraldeide 3-fosfato** viene esportata nel citosol dove viene trasformata in **saccarosio**.

La **gliceraldeide 3-fosfato** che rimane nel cloroplasto è convertita in amido (amido I o di assimilazione nello stroma)

Di notte, a partire dall'amido viene prodotto saccarosio (la principale forma di trasporto dello zucchero nelle piante)



# Rubisco

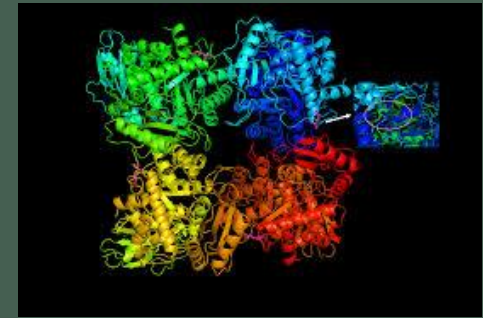
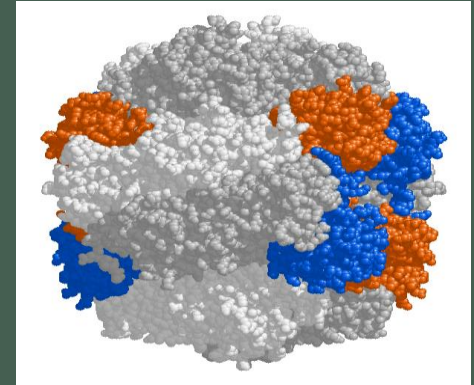
Le piante producono quantità enormi di questo enzima:

circa il 25% di tutto il materiale proteico presente nei cloroplasti

ed il 50% di quello dello stroma.

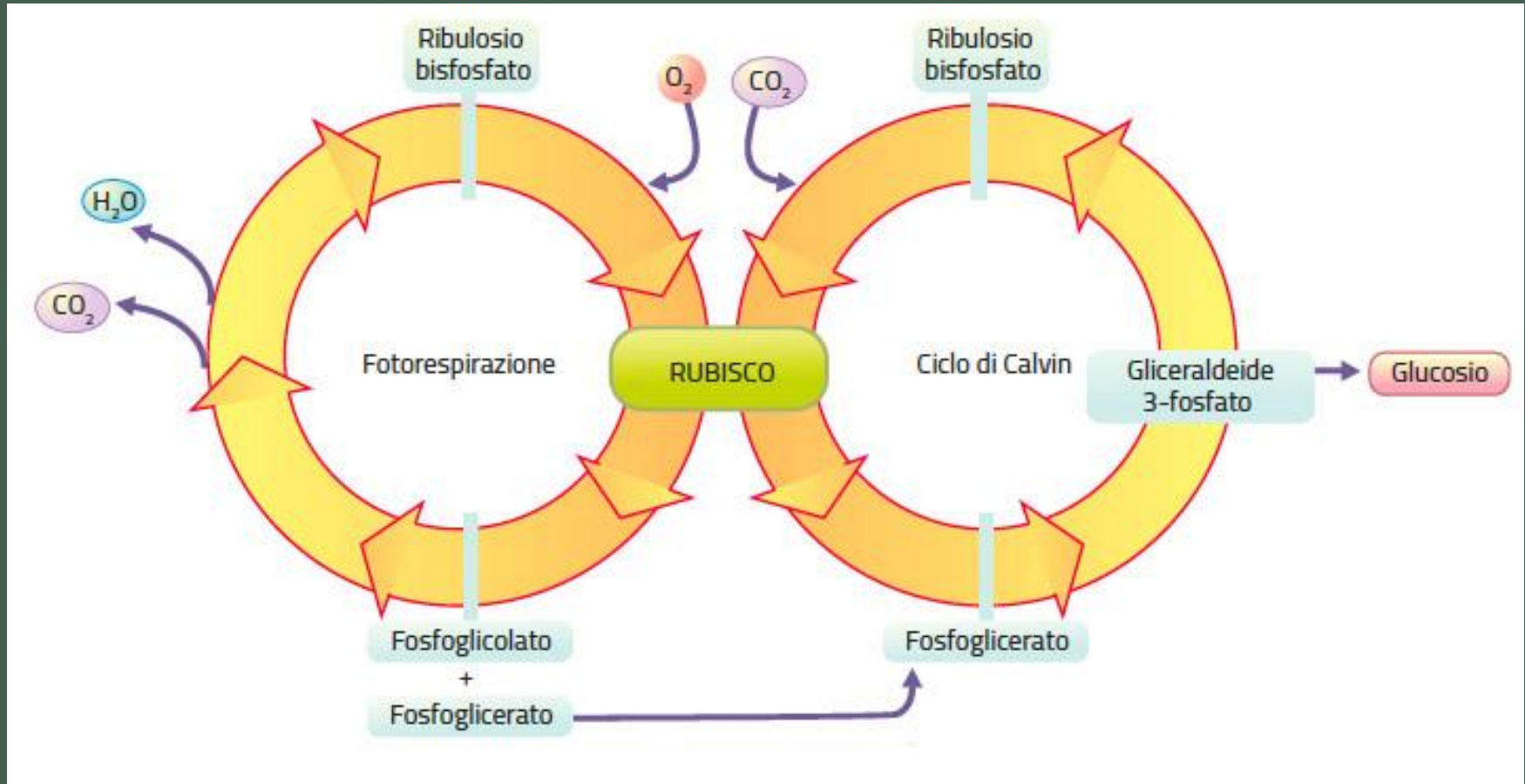
la Rubisco è la più abbondante proteina presente sulla Terra

- la rubisco catalizza sia la carbossilazione (ciclo di Calvin) che l'ossidazione del ribulosio 1,5 difosfato



# La Rubisco può legare $O_2$ al posto di $CO_2$

- il processo di ossigenazione, detto fotorespirazione, agisce in maniera opposta al ciclo di fissazione della  $CO_2$  ed avviene nelle stesse cellule ed in contemporanea con il ciclo di Calvin



- la fotorespirazione porta alla liberazione di  $CO_2$ , al consumo di ossigeno ed alla perdita di peso secco

- il ciclo di Calvin porta al consumo di  $CO_2$ , alla liberazione di ossigeno ed all'aumento del peso secco

- il rapporto di carbossilazione/ossigenazione del ribulosio 1,5 difosfato è di circa 3:1 nelle condizioni presenti nell'aria atmosferica
- il ciclo di Calvin è in grado di funzionare in maniera autonoma, mentre la fotorespirazione richiede il ciclo di Calvin per la formazione dell'accettore iniziale (ribulosio)

Ossidazione fotorespiratoria del carbonio implica l'interazione operativa di 3 organuli:

-cloroplasto

-perossisoma

-mitocondrio

- il consumo di ossigeno avviene in tutti gli organuli

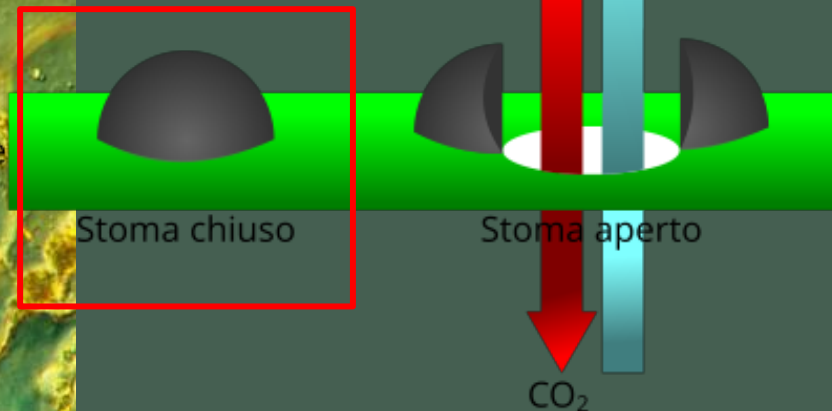
La condensazione di  $O_2$  con Rubisco avviene contemporaneamente alla fissazione di  $CO_2$

In alcune condizioni il rapporto  $CO_2/O_2$  può essere alterato a favore dell'  $O_2$



In condizioni di aridità gli stomi si chiudono

**FOTORESPIRAZIONE**



# La fotorespirazione è un processo necessario:

- ∅ per convertire alcuni prodotti indesiderati della fotosintesi (ac. glicolico e fosfoglicolico) in carboidrati
- ∅ Per fornire intermedi metabolici utilizzati per la sintesi di acidi nucleici, aminoacidi, acidi grassi e altri metaboliti secondari
- ∅ Come meccanismo di protezione dei centri di reazione della fotosintesi verso i prodotti foto-ossidativi in presenza di alte radiazione e stress idrico

# Piante C4

Il ciclo C4 per la concentrazione della CO<sub>2</sub>

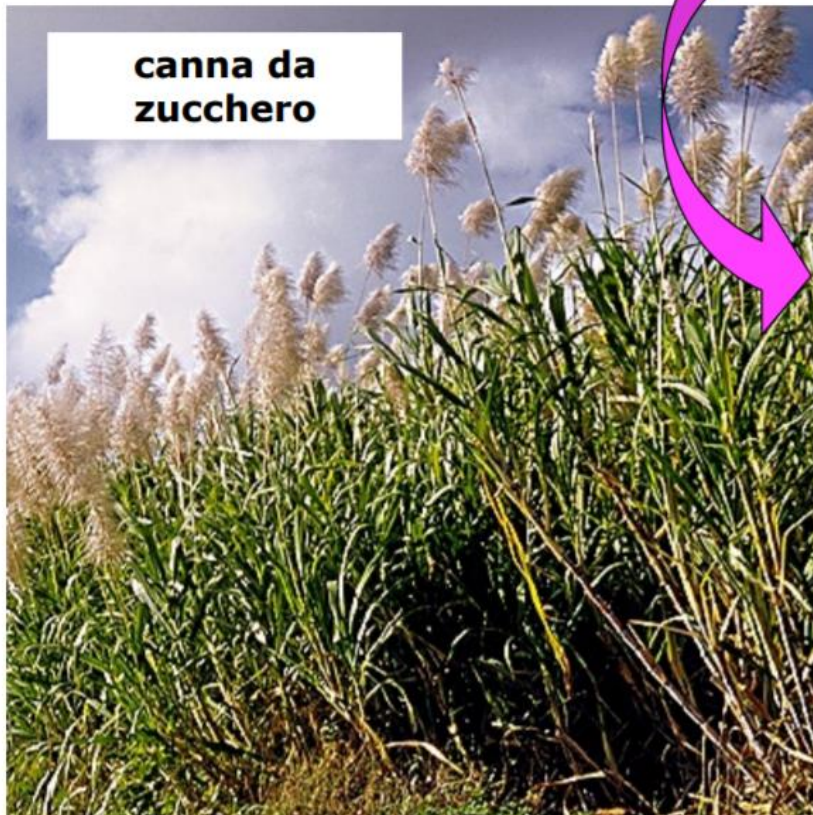
Molte piante non fotorespirano per nulla o lo fanno in modo molto limitato. La loro ridotta fotorespirazione dipende da un meccanismo di concentrazione della CO<sub>2</sub> nell'ambiente in cui si trova la rubisco, sopprimendo così le reazioni di ossigenazione



**Piante C4:** Mais, Sorgo, canna da zucchero, Vivono in climi tropicali con elevata intensità luminosa e poca disponibilità idrica. Hanno evoluto una via differente per ridurre la fotorespirazione e incrementare la quantità di CO<sub>2</sub> che giunge all'enzima Rubisco



# PIANTE C4



$^{14}\text{CO}_2$

acido malico  
acido aspartico

**16 FAMIGLIE (15% piante)**  
(mono e dicotiledoni)

**Graminacee, mais, canna da zucchero**



sorgo



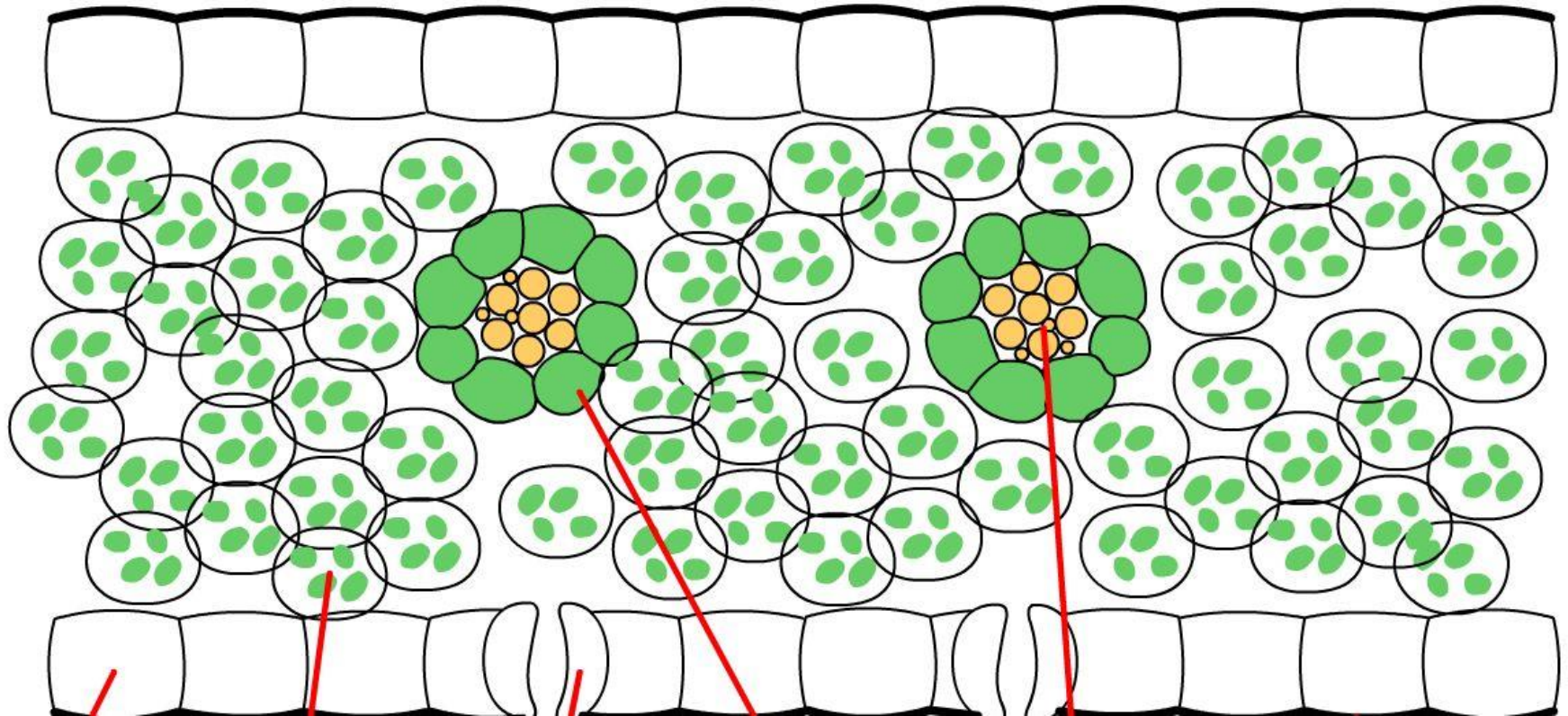
mais

**DUE ADATTAMENTI:**

- Anatomico
- Biochimico

# Disposizione a corona: **Anatomia Kranz**

**Anatomia delle foglie di piante C4:** Coinvolge due diversi tipi di cellule contenenti cloroplasti: le cellule del mesofillo e quelle della guaina del fascio. Le cellule del mesofillo circondano quelle della guaina del fascio le quali, a loro volta, circondano il tessuto vascolare. Un botanico tedesco del diciannovesimo secolo che per primo descrisse questa particolarità, la chiamò anatomia del Kranz (corona)

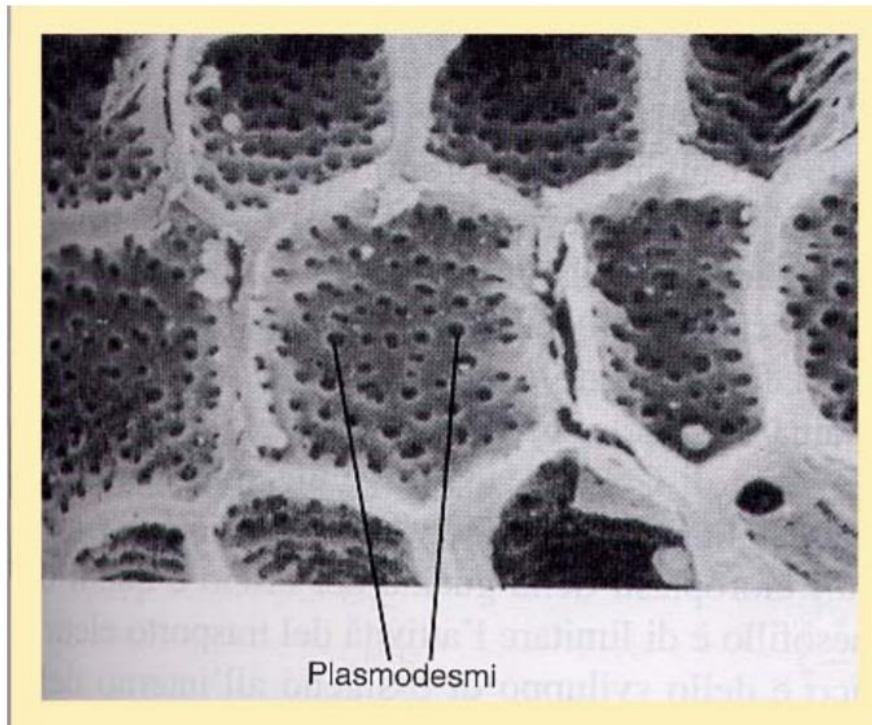


Cellule del  
mesofillo

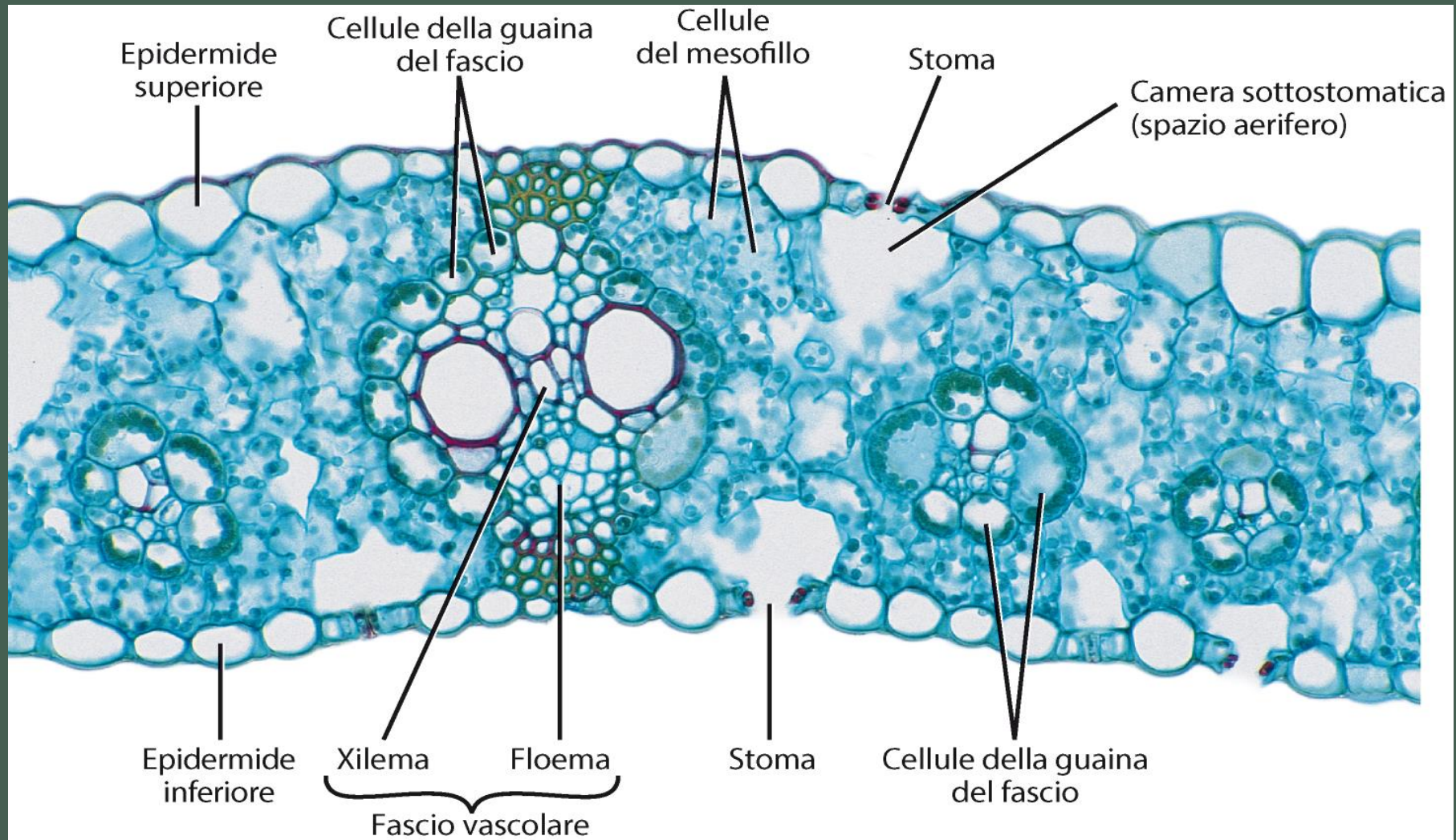
Cellule della  
guaina del  
fascio

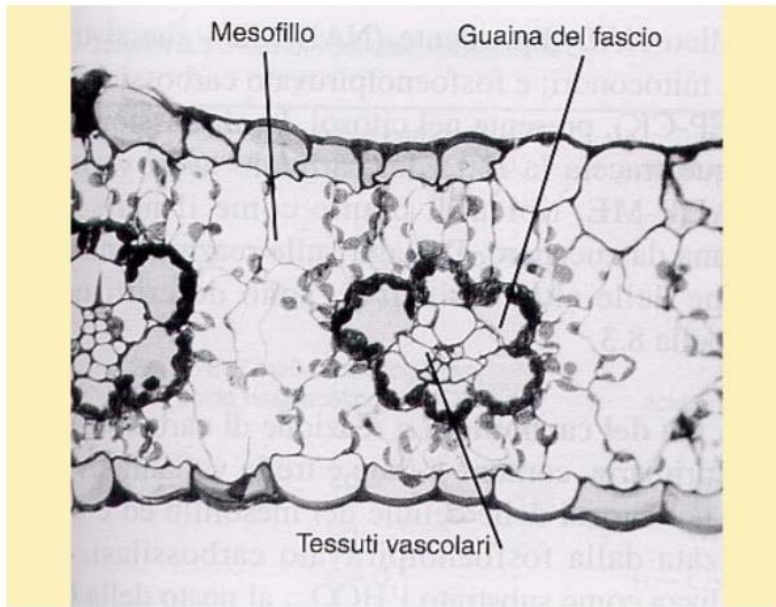
Tessuto  
vascolare

Le cellule della guaina del fascio e quelle del mesofillo sono in comunicazione tramite una fitta rete di plasmodesmi, garantendo il flusso dei metaboliti fra le cellule

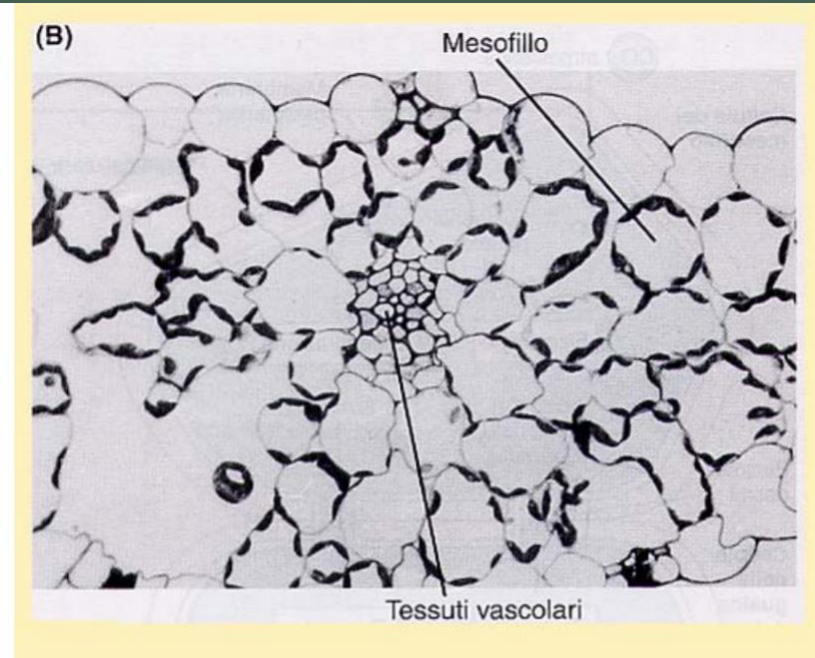


# Disposizione a corona: Anatomia Kranz



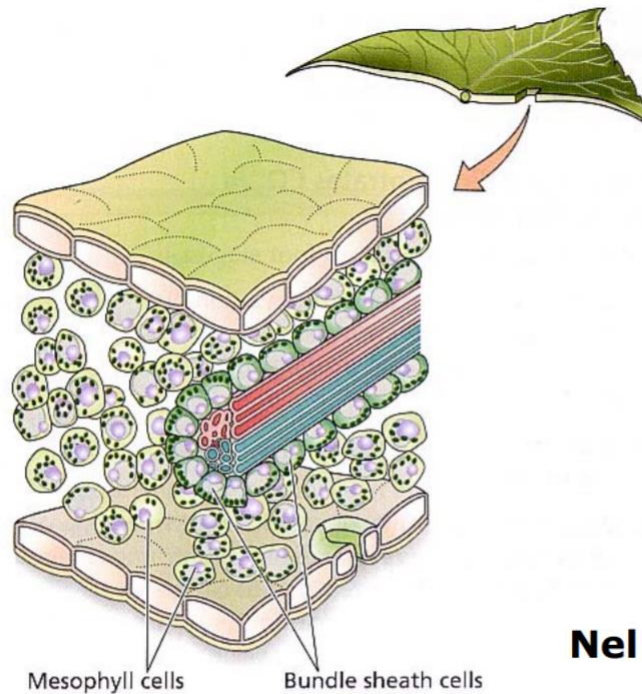


***Zea mays* (C4)  
monocotiledone**



***Avena sativa* (C3)**

## Schema struttura foglia di pianta C<sub>4</sub>



**Nel ciclo C<sub>4</sub> vengono operate 2 fissazioni della CO<sub>2</sub>**

**La prima nel mesofillo ad opera della**

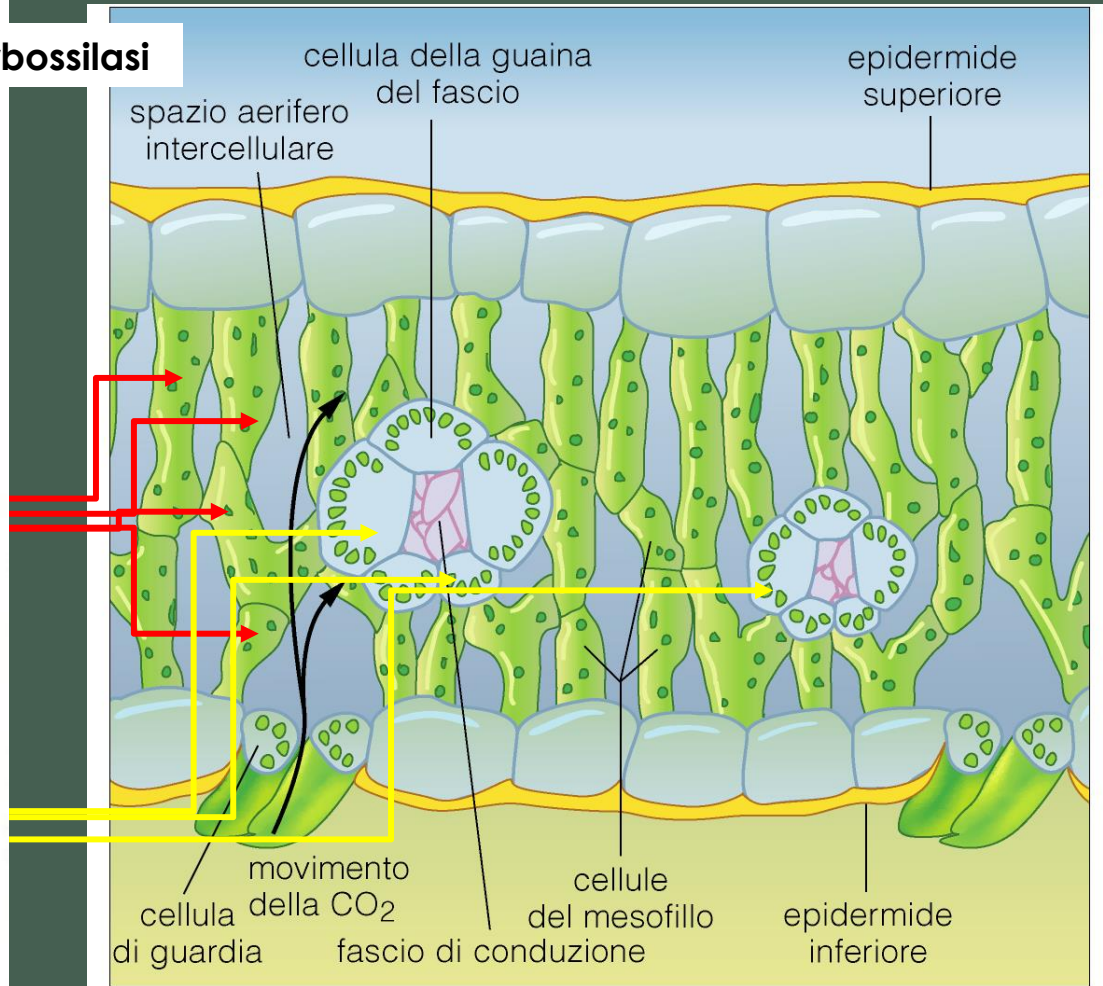
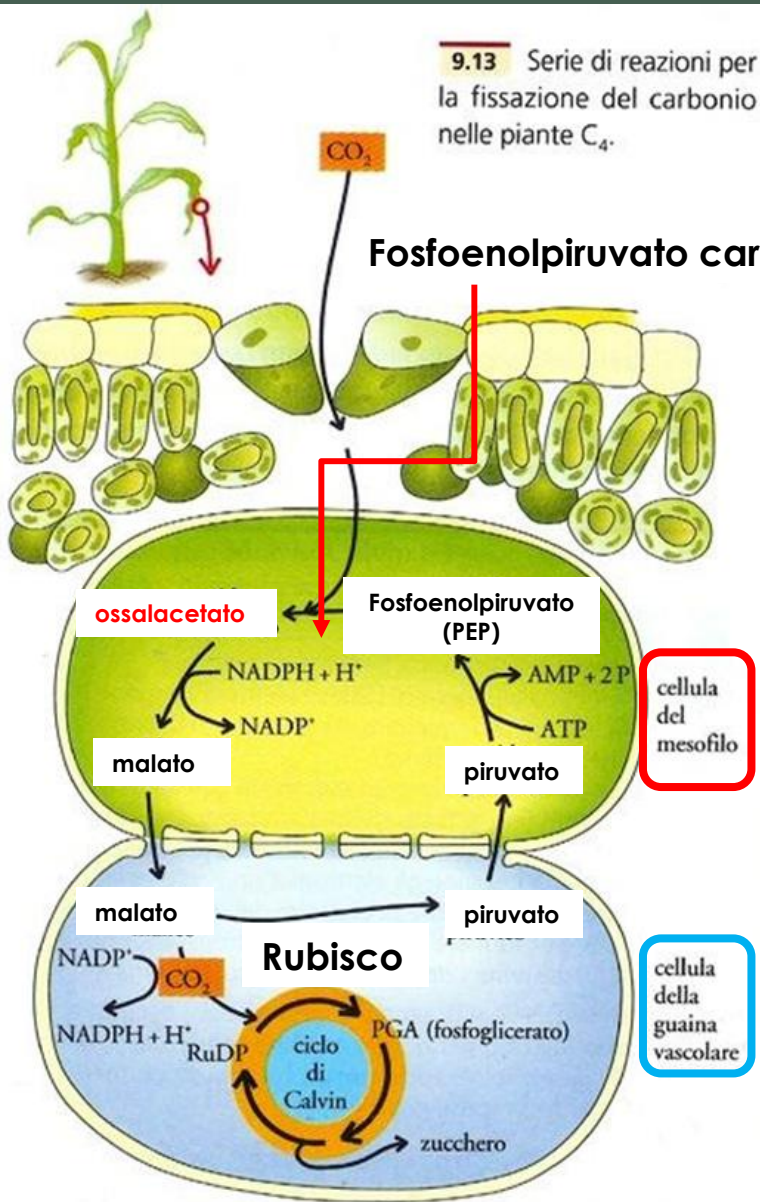
**FOSFOENOLPIRUVICO CARBOSSILASI**

**La seconda nelle cellule della guaina dei fasci**

**ad opera della **Rubisco****

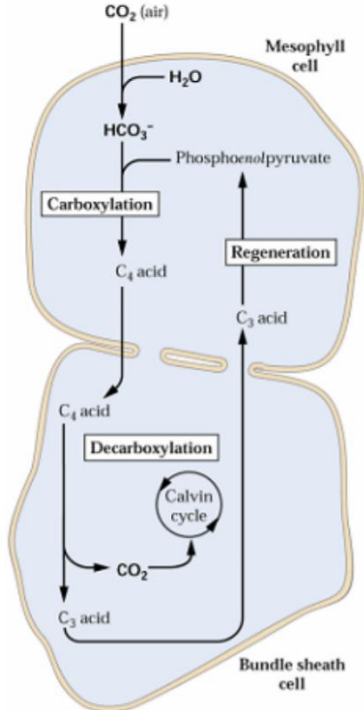
In alcune piante il primo prodotto della fissazione della CO<sub>2</sub> non è il 3-fosfoglicerato (3 atomi di C), ma l'**ossalacetato** (4 atomi di C)

## PIANTE C4



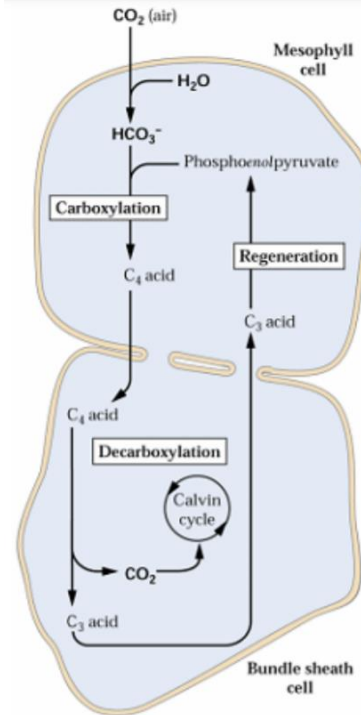
## **IL CICLO C4 PUO' ESSERE SUDDIVISO IN 4 FASI**

- **Fissazione della CO<sub>2</sub> in un acido C<sub>4</sub> (PEP mesofillo)**
- **Trasporto acido C<sub>4</sub>**
- **Decarbossilazione acido C<sub>4</sub> (cellule della guaina)**
- **Trasporto composto C<sub>3</sub> e rigenerazione accettore (mesofillo)**



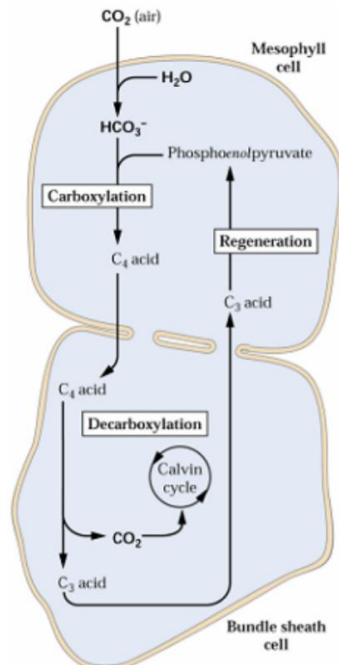
**FISSAZIONE CO<sub>2</sub>**

La CO<sub>2</sub> entra nelle cellule del mesofillo ed è convertita a HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> nell'ambiente acquoso del citoplasma. HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> reagisce con il PEP (fosfoenolpiruvato) a formare un acido C4 (malico e/o aspartico)



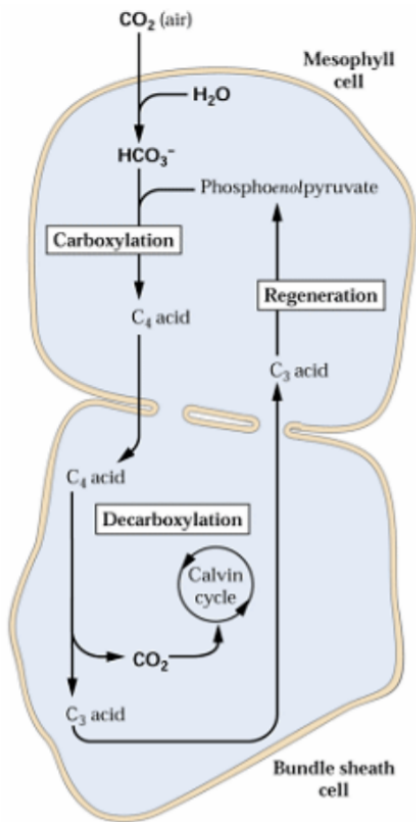
**TRASPORTO**

l'acido C4 viene trasportato nelle cellule della guaina del fascio

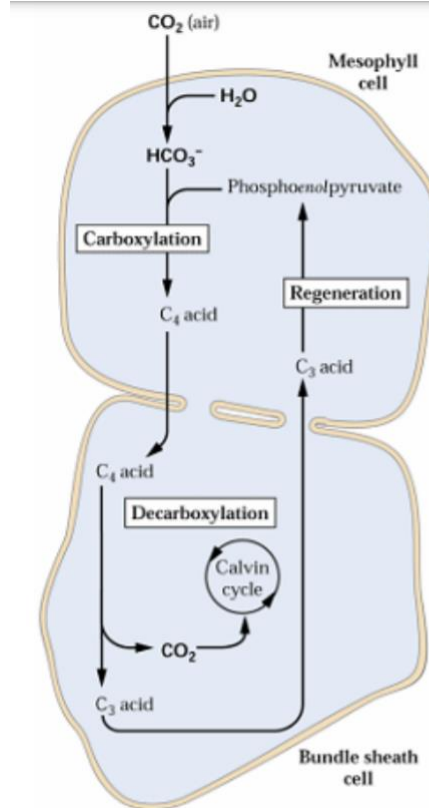


**DECARBOSSILAZIONE**

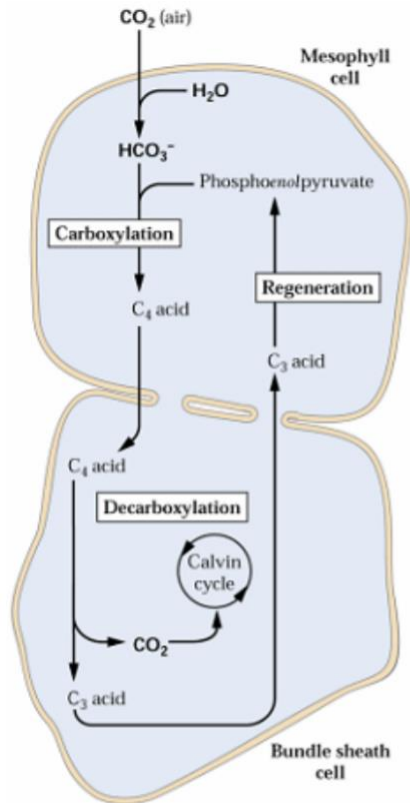
l'acido C4 viene decarbossilato, con liberazione di CO<sub>2</sub>, che entra nel ciclo di Calvin



**TRASPORTO**  
 l'acido C3 viene trasportato nelle cellule del mesofillo



**RIGENERAZIONE**  
 Viene rigenerato l'accettore originale della  $\text{CO}_2$ , l'acido fosfoenolpiruvico

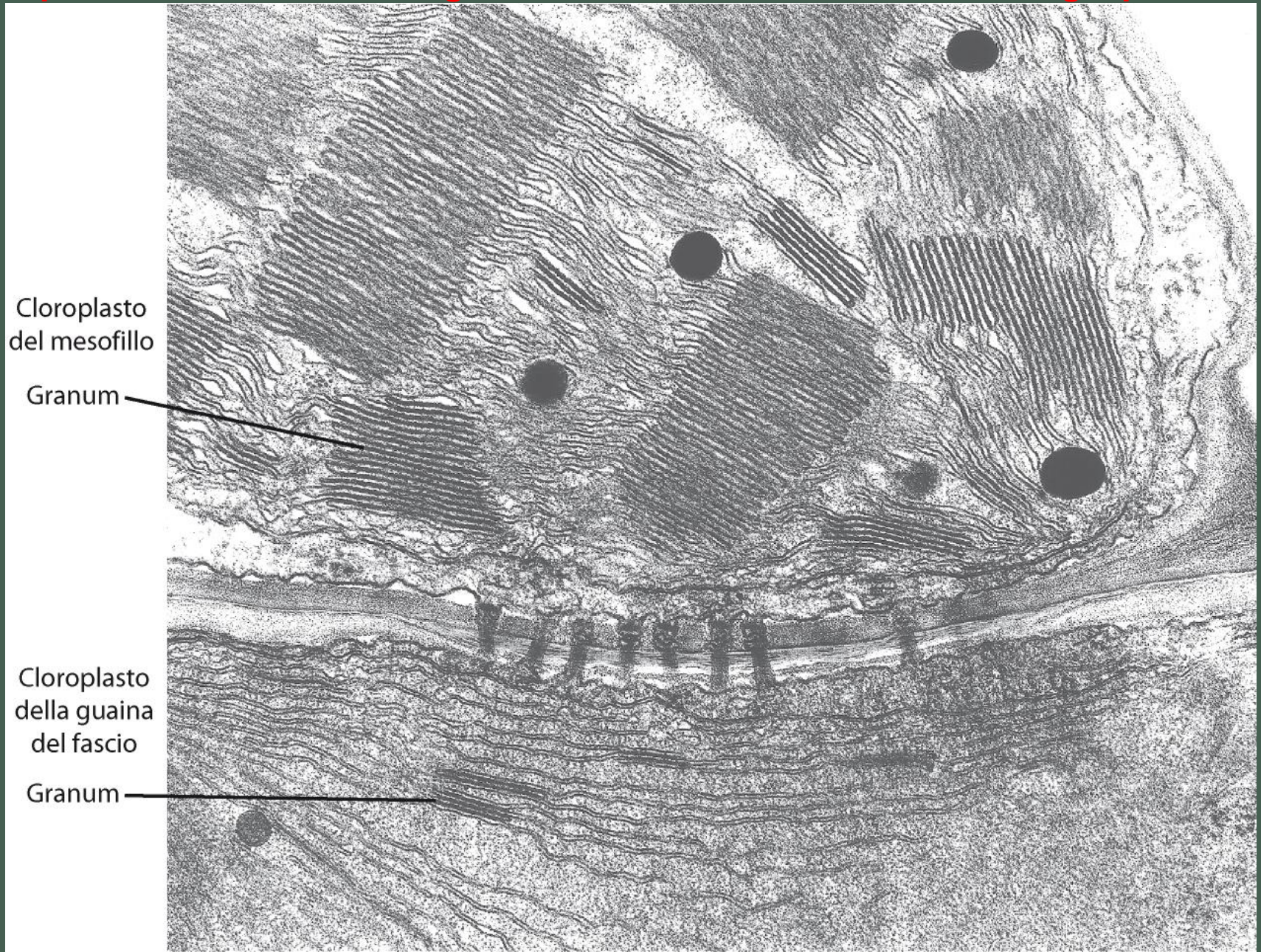


## RISULTATO

**+  $\text{CO}_2$  nei pressi della Rubisco  
di quanto non sia possibile in  
condizioni di equilibrio con  
l'atmosfera esterna**

**- fotorespirazione**

# I cloroplasti delle cellule della guaina del fascio hanno una morfologia particolare



Cloroplasto del mesofillo

Granum

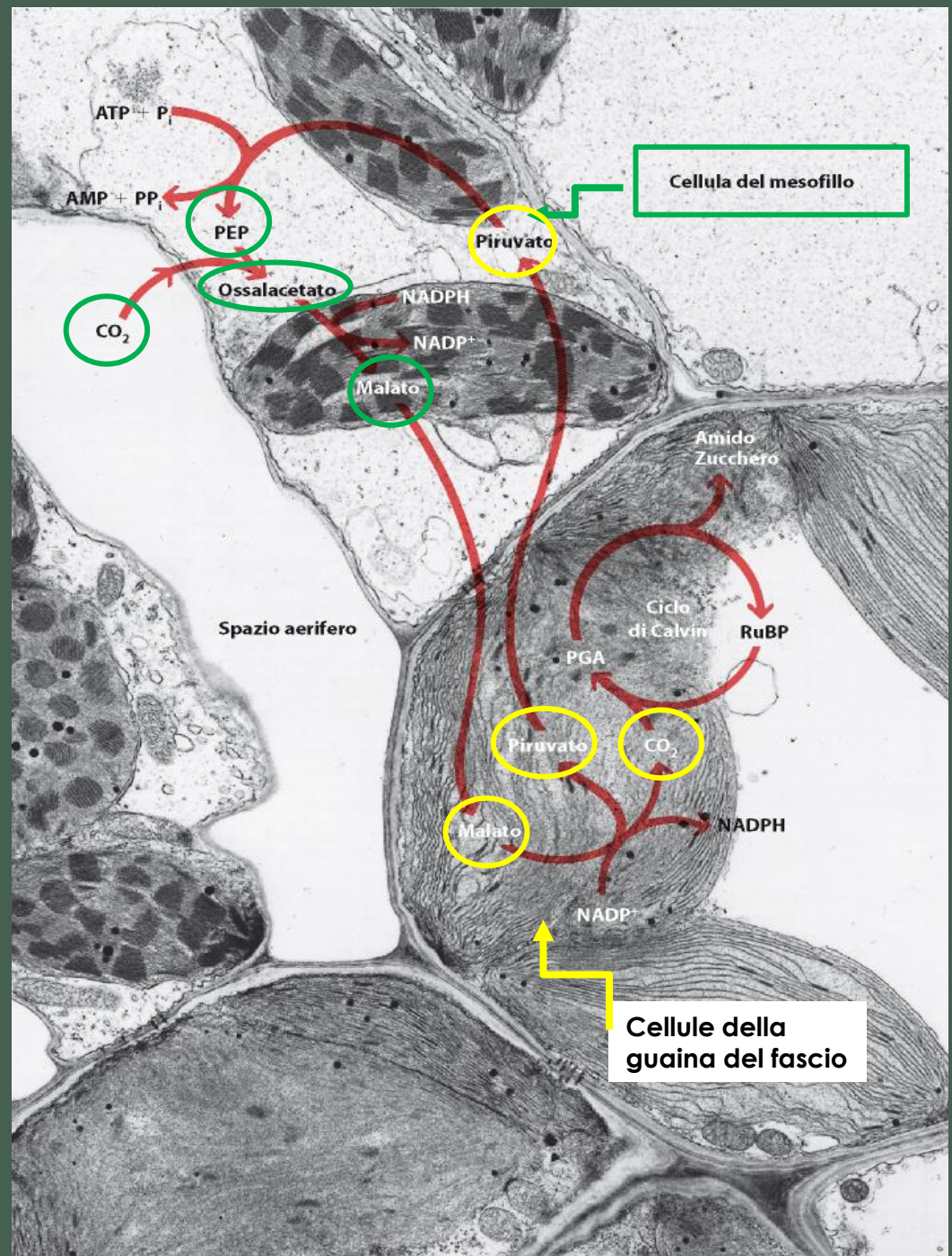
Cloroplasto della guaina del fascio

Granum

0,5  $\mu$ m

La quantità di  $\text{CO}_2$  nelle cellule della guaina del fascio è **10 volte superiore** rispetto a quella nelle cellule delle piante  $\text{C}_3$

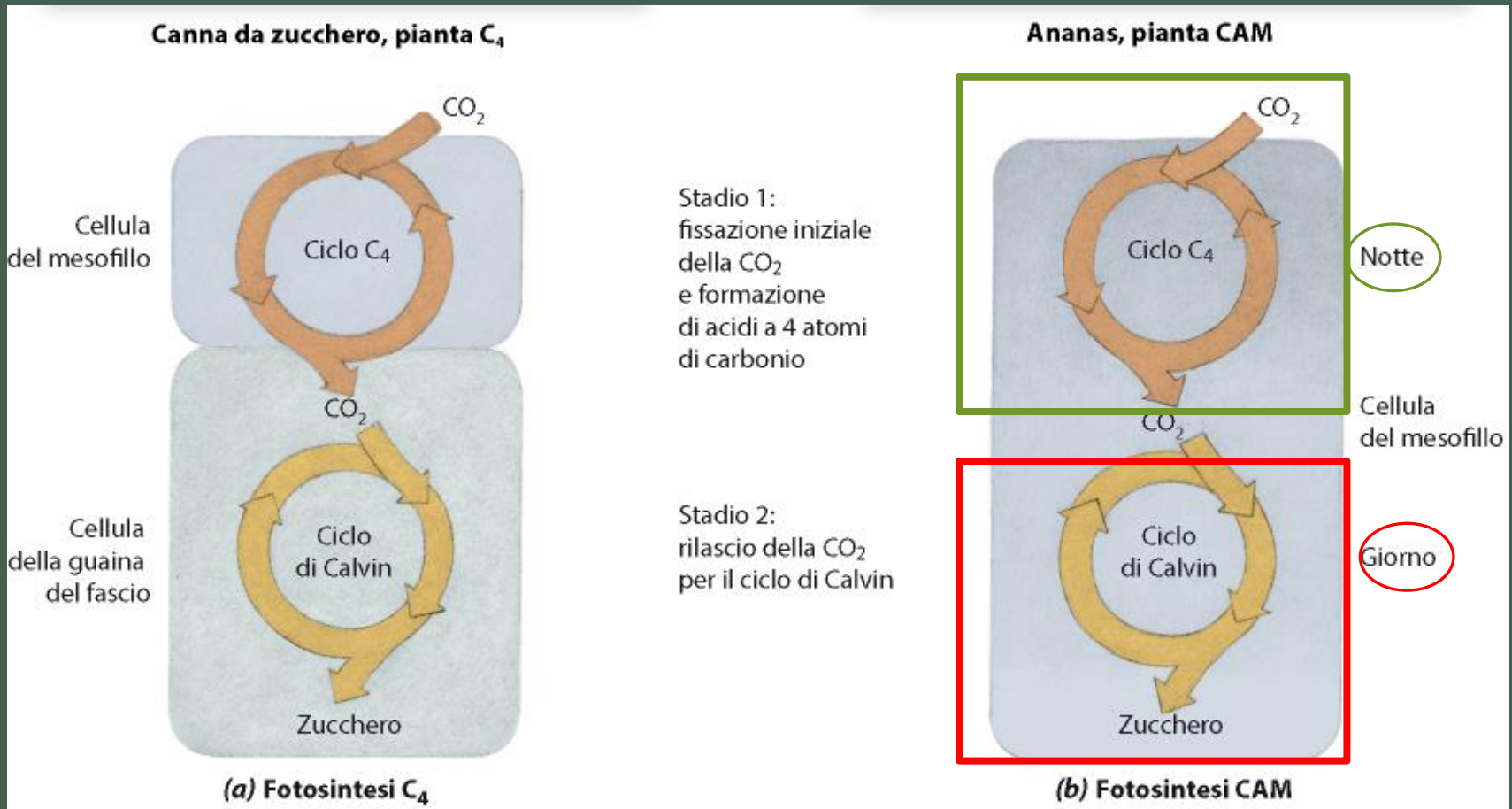
Soppressione della fotorespirazione nelle cellule della guaina del fascio



# Le PIANTE CAM

CAM = METABOLISMO ACIDO DELLA CRASSULACEAE

Adattamento ad ambienti caldi e aridi, esempio i Cactus (5% delle piante)

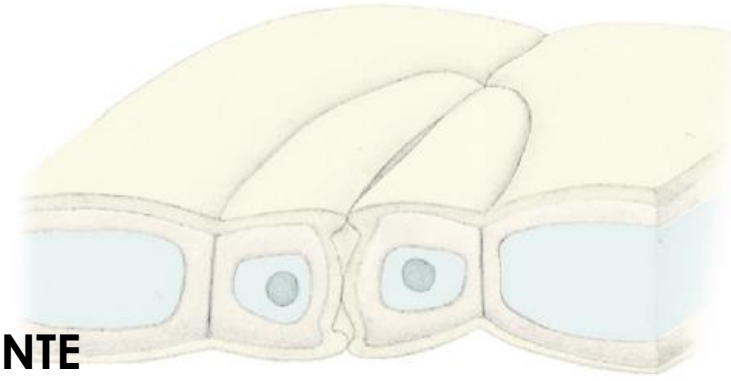
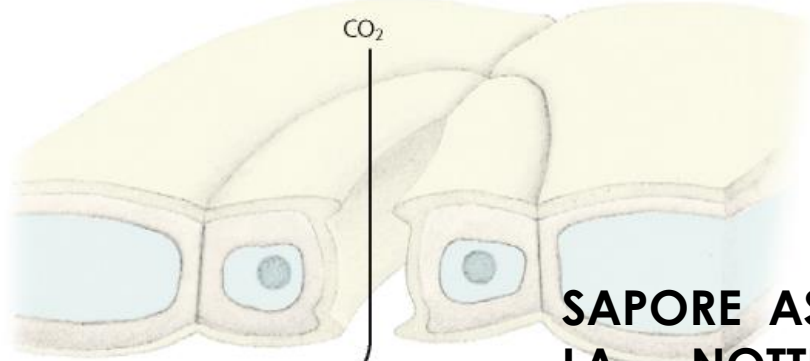


Separazione temporale (non spaziale) della via metabolica C<sub>4</sub> e C<sub>3</sub>

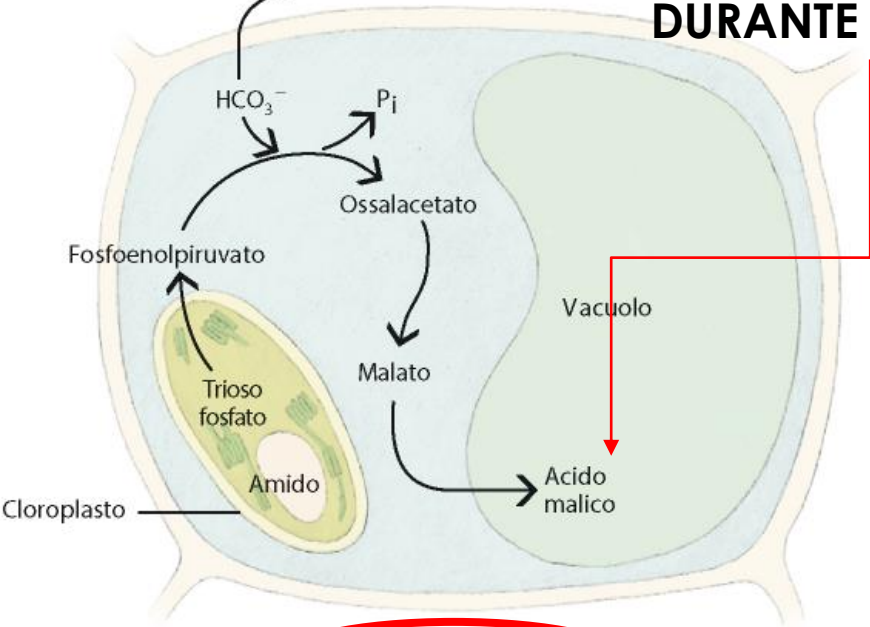
# Come funziona

Gli stomi aperti consentono l'ingresso di  $\text{CO}_2$  e la perdita di  $\text{H}_2\text{O}$

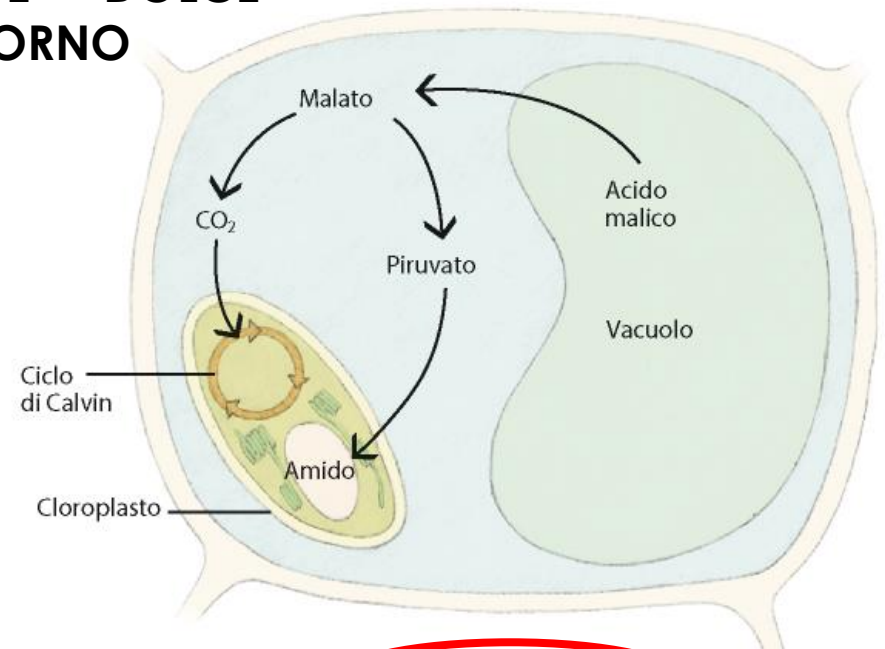
Gli stomi chiusi evitano l'ingresso di  $\text{CO}_2$  e la perdita di  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$



**SAPORE ASPRO DURANTE LA NOTTE E DOLCE DURANTE IL GIORNO**



**(a) Notte: stomi aperti**



**(b) Giorno: stomi chiusi**

# Le PIANTE CAM

Sono più diffuse delle piante C4

Le piante CAM hanno la capacità di fissare la  $\text{CO}_2$  al buio.

Durante il periodo di luce l'acido malico viene decarbossilato e la  $\text{CO}_2$  viene trasferita al RuBP del ciclo di Calvin, nella stessa cellula

Le cellule devono avere grandi vacuoli (stoccaggio dell'acido malico) e Cloroplasti nei quali la  $\text{CO}_2$  ottenuta dall'acido malico può essere trasformata in carboidrati

Limitano la perdita d'acqua

Una CAM perde 50-100 g di acqua per g di  $\text{CO}_2$  acquistato

Una C4 ne perde 250-300 g

Una C3 ne perde 400-500 g

# Piante CAM



***non è limitato alle Crassulacee***

*In alcune specie il metabolismo CAM è inducibile*



***agave***



***ananas***



***vaniglia***



***orchidea***

# RESPIRAZIONE E GLICOLISI

- con la fotosintesi la pianta produce carboidrati fondamentali alla propria esistenza (e a quella di tutti gli esseri viventi)
- la respirazione aerobica è quel processo biologico attraverso il quale i composti organici ridotti sono mobilitati e quindi ossidati in maniera controllata
- con la glicolisi e la respirazione si ottiene il rilascio dell'energia accumulata nei carboidrati, energia necessaria a tutto il metabolismo vitale
- La respirazione aerobica è un processo comune a tutti gli organismi eucarioti ed, in linea generale, il processo respiratorio delle piante superiori è simile a quello che troviamo anche negli animali

# Energia e metabolismo: RESPIRAZIONE

Le piante sono in grado di convertire l'energia della luce in energia chimica (fotosintesi clorofilliana). I composti organici in cui questa energia viene immagazzinata sono i carboidrati (principalmente saccarosio e amido).

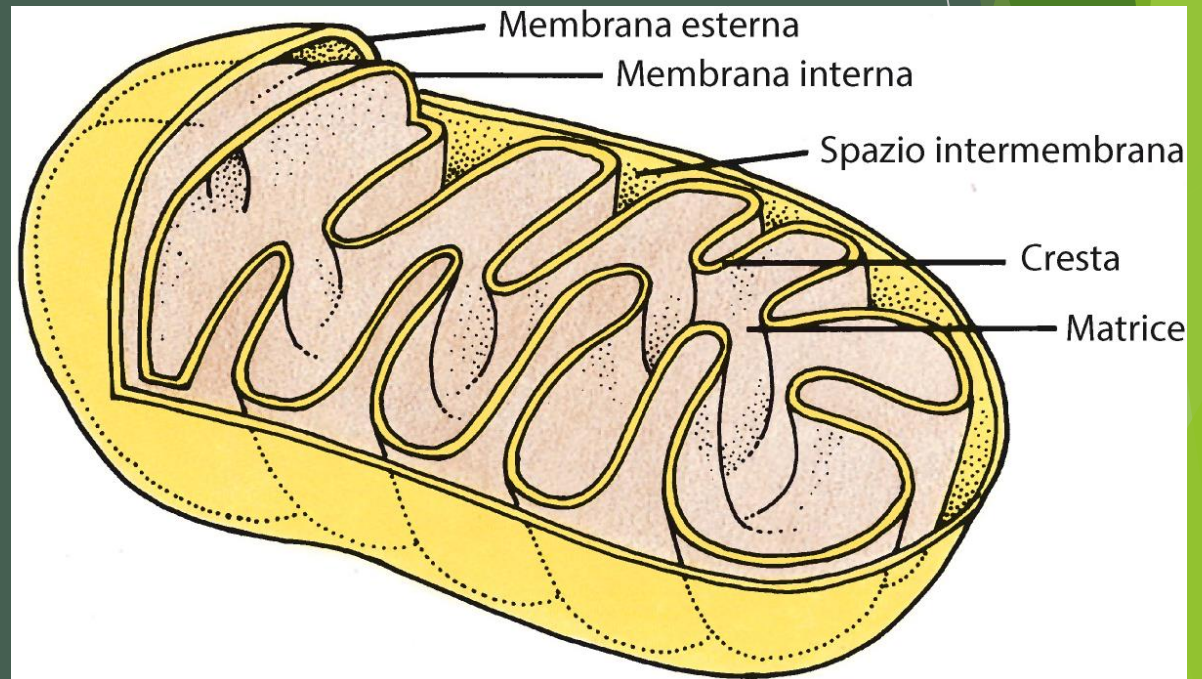
Tutti gli organismi viventi sono in grado di utilizzare questa energia attraverso vie metaboliche che prendono il nome di **respirazione cellulare**. Tale processo permette di degradare molecole organiche come glucosio o polimeri come l'amido in sostanze chimicamente semplici ( $\text{CO}_2$  e acqua) e di conservare l'energia libera nei legami *fosfodiesterici* altamente energetici dell'ATP (Adenosina Trifosfato), molecola che verrà poi usata nei processi metabolici.

# RESPIRAZIONE



Fotosintesi

Mitocondri  
sede della respirazione



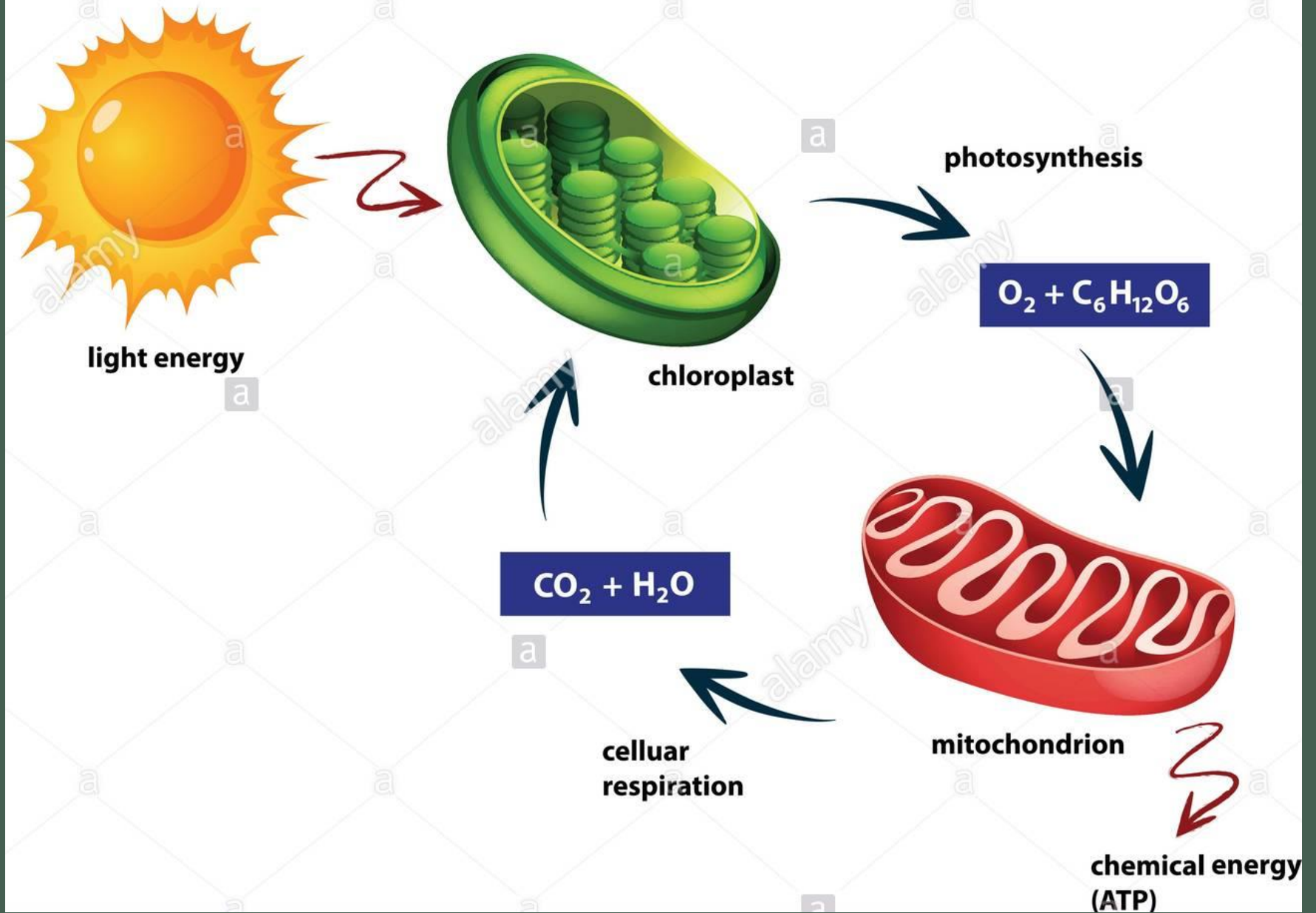
L'ATP formato, all'interno dei mitocondri, rappresenta l'energia utilizzabile necessaria per tutte le attività cellulari che richiedono energia (trasporto attivo attraverso le membrane, movimenti degli organelli, ecc.).

Durante la respirazione si formano inoltre gli intermedi di degradazione del glucosio, che sono utilizzati nella sintesi di altre molecole quali amminoacidi, grassi, acidi nucleici ed altre ancora più complesse e indispensabili per la crescita e lo sviluppo della pianta.

In generale si può dire che la respirazione consiste in una serie di reazioni biochimiche che permettono di liberare in modo controllato l'energia durante l'ossidazione del glucosio e di intrappolarla in ATP.

I composti organici e l'ossigeno prodotti durante la fotosintesi con l'utilizzo dell'energia luminosa sono convertiti durante la respirazione sia nelle piante che negli animali in composti inorganici ( $\text{CO}_2$  e acqua) ed energia utile.

# Cellular Respiration



## La respirazione cellulare può essere di due tipi: aerobica ed anaerobica.

La **respirazione aerobica** è quella che richiede ossigeno come accettore terminale di elettroni. In certe condizioni l'ossigeno non è disponibile, per cui deve essere utilizzato un accettore di elettroni; in questo caso si parla di **respirazione anaerobica**, chiamata anche **fermentazione**.

Gli animali e le piante necessitano dell'ossigeno per la loro respirazione, per cui sono **aerobi obbligati**, mentre alcuni batteri, chiamati anche **anaerobi obbligati**, utilizzano esclusivamente la respirazione anaerobica e, in presenza di ossigeno, muoiono. Molti funghi, alcuni tipi di tessuti animali ed alcune piante sono **aerobi facoltativi** (o **anaerobi facoltativi**), in quanto in presenza di ossigeno usano la respirazione aerobica e, in sua assenza, quella anaerobica. Tuttavia molti funghi, ed in particolare i lieviti, possono vivere all'infinito anaerobicamente, mentre i tessuti animali e vegetali possono farlo per breve tempo.

### Relazioni tra tipi diversi di organismi e presenza o assenza di ossigeno

	Presenza di ossigeno	Assenza di ossigeno
Aerobi obbligati	Respirazione aerobica: capaci di vivere	Nessun tipo di respirazione: morte
Anaerobi obbligati	L'ossigeno distrugge alcuni metaboliti vitali: morte	Fermentazione: capaci di vivere
Organismi facoltativi	Respirazione aerobica: capaci di vivere	Fermentazione: capaci di vivere

**LA RESPIRAZIONE AEROBICA**; è un processo esotermico (esoergonico) che consiste nella demolizione di sostanze organiche complesse come gli zuccheri. Esso è suddiviso in numerose reazioni parziali, regolate ciascuna da almeno un enzima.

Il primo gruppo di reazioni, di circa dieci tappe, è detto **glicolisi** (= scissione dello zucchero) e si svolge in assenza di ossigeno. Si tratta pertanto di un *processo anaerobico* che va dal **glucosio (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>)** alla formazione di **acido piruvico (CH<sub>3</sub>-CO- COOH)**.

- **La respirazione può essere suddivisa in tre tappe successive:**

1. GLICOLISI

2. CICLO DI KREBS

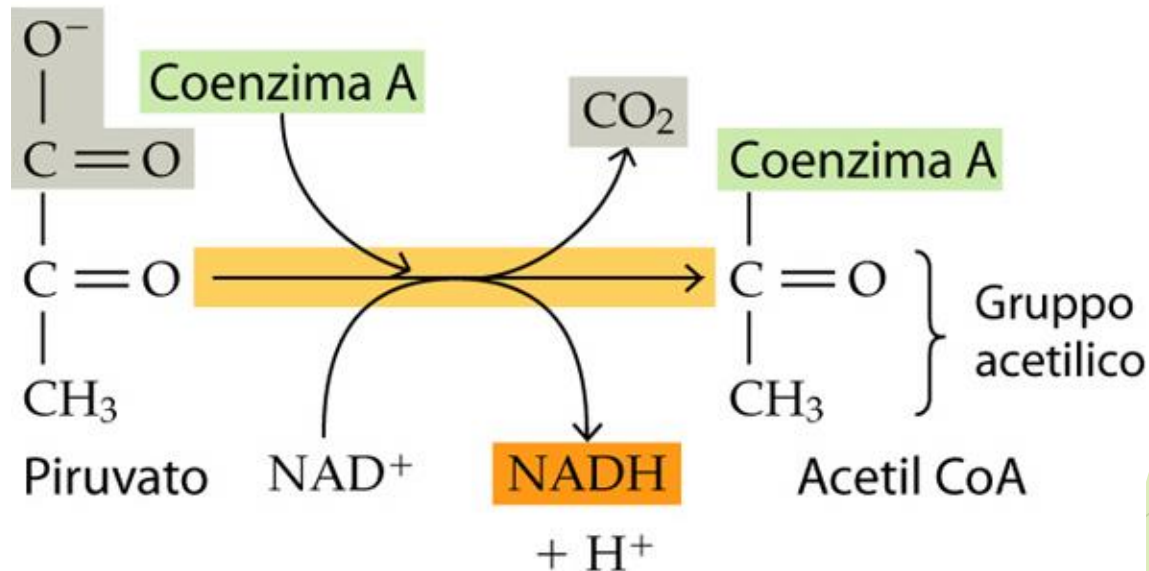
3. TRASPORTO ELETTRONICO MITOCONDRIALE o FOSFORILAZIONE OSSIDATIVA

## Prima tappa: GLICOLISI

Il piruvato che si è formato nella glicolisi passa nella matrice mitocondriale ma non viene utilizzato come tale nel ciclo di Krebs.

Nel mitocondrio il piruvato viene **ossidato e decarbossilato**, una molecola di  $\text{CO}_2$  si stacca dal piruvato, gli  $\text{e}^-$  vengono rimossi ed accettati dal  $\text{NAD}^+$  che si riduce a  $\text{NADH}$ .

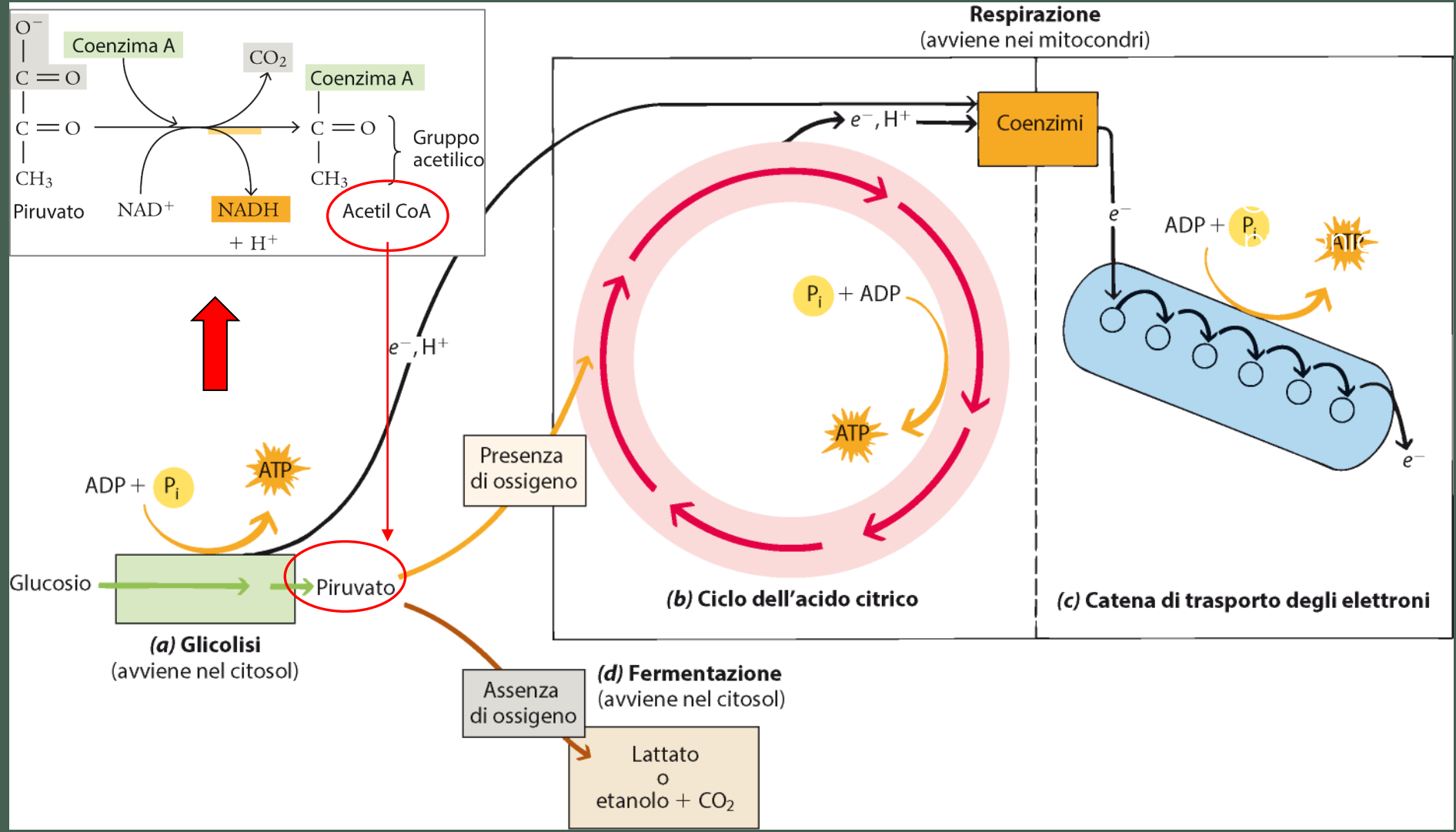
Le 2 molecole di piruvato si ossidano a gruppi acetilici  $-\text{CH}_3\text{CO}$



Ogni gruppo acetilico si lega temporaneamente al coenzima A per formare l'acetil CoA.

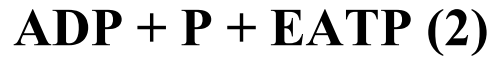
Quest'ultimo entra nel ciclo di Krebs.

# Seconda tappa: CICLO DI KREBS



Dato che quest'ultimo processo (endoergonico) avviene soprattutto dall'energia ottenuta dal ciclo di Krebs, in **presenza** di ossigeno, viene detto "fosforilazione ossidativa". In estrema sintesi, l'intero processo può essere riassunto con due reazioni:





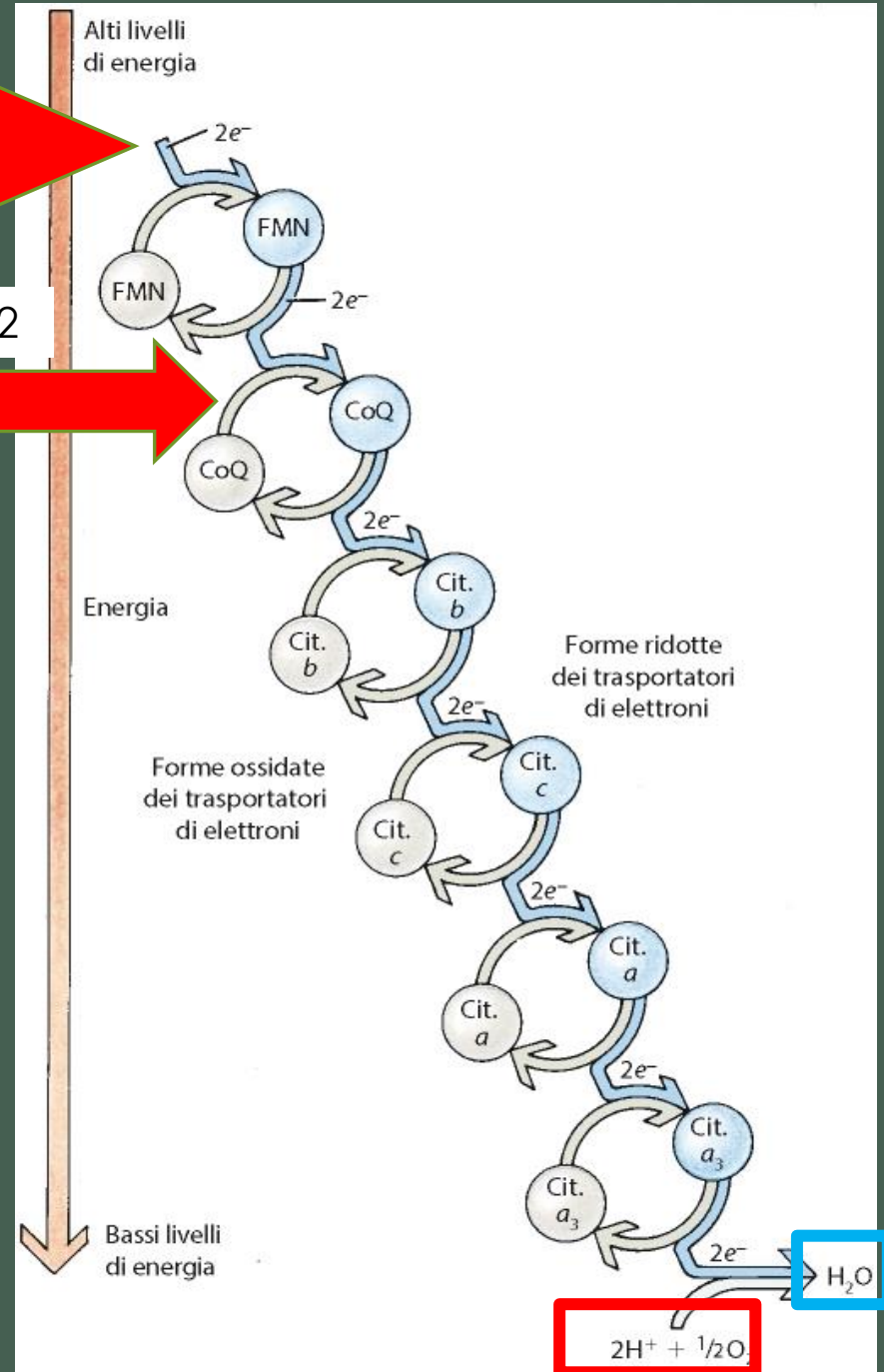
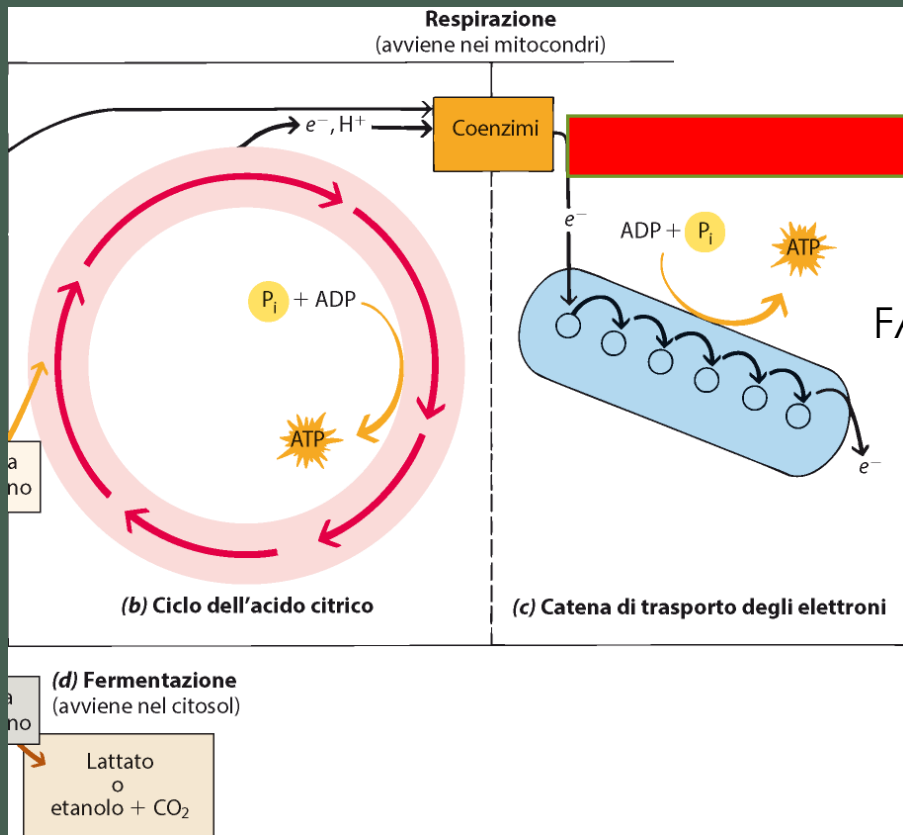
La reazione esotermica (1) riassume la demolizione dello zucchero che avviene attraverso la glicolisi anaerobica e il ciclo di Krebs.

L'energia liberata viene immagazzinata attraverso la reazione endotermica (2) di formazione di ATP a partire dall'ADP.

L'ATP contiene nella sua molecola legami ad alto contenuto energetico che possono essere scissi secondo le sequenze ATP-ADP-AMP con liberazione di energia ad ogni passaggio.

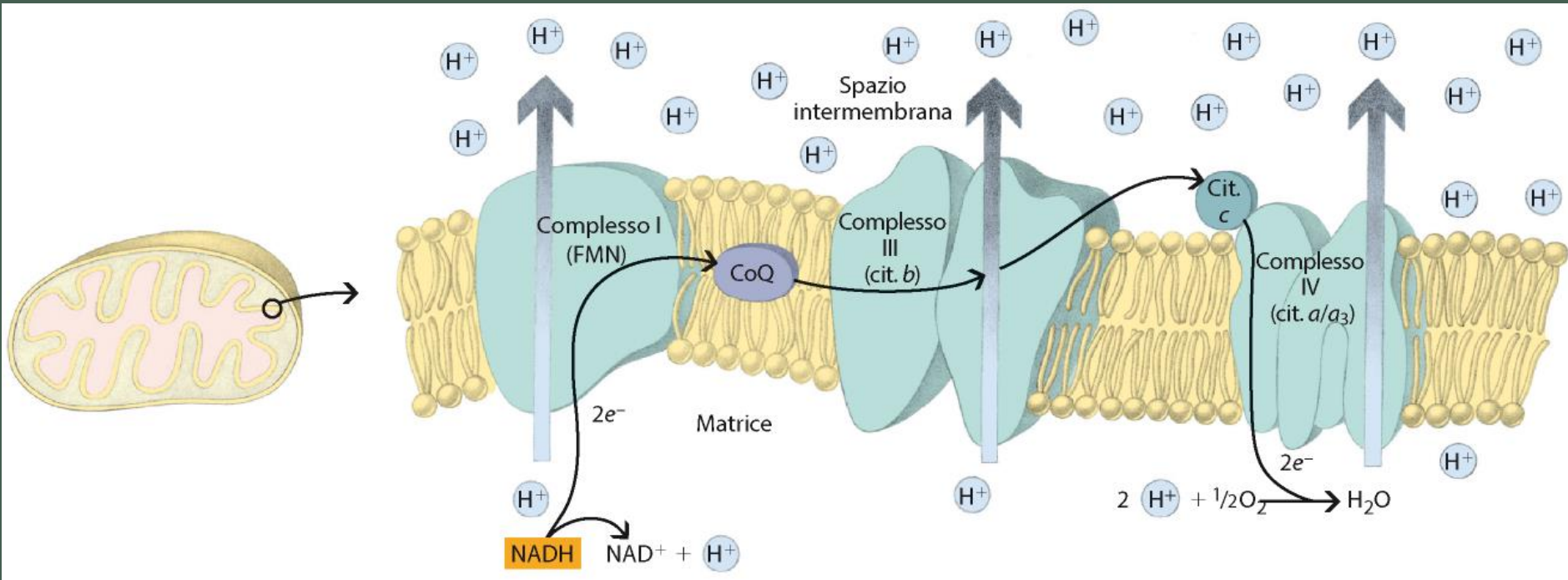
L'incorporazione dell'energia nell'ATP avviene con tre diverse modalità:

1. fosforilazione a livello del substrato nella glicolisi;
2. fosforilazione ossidativa durante la respirazione;
3. fotofosforilazione nella fotosintesi.

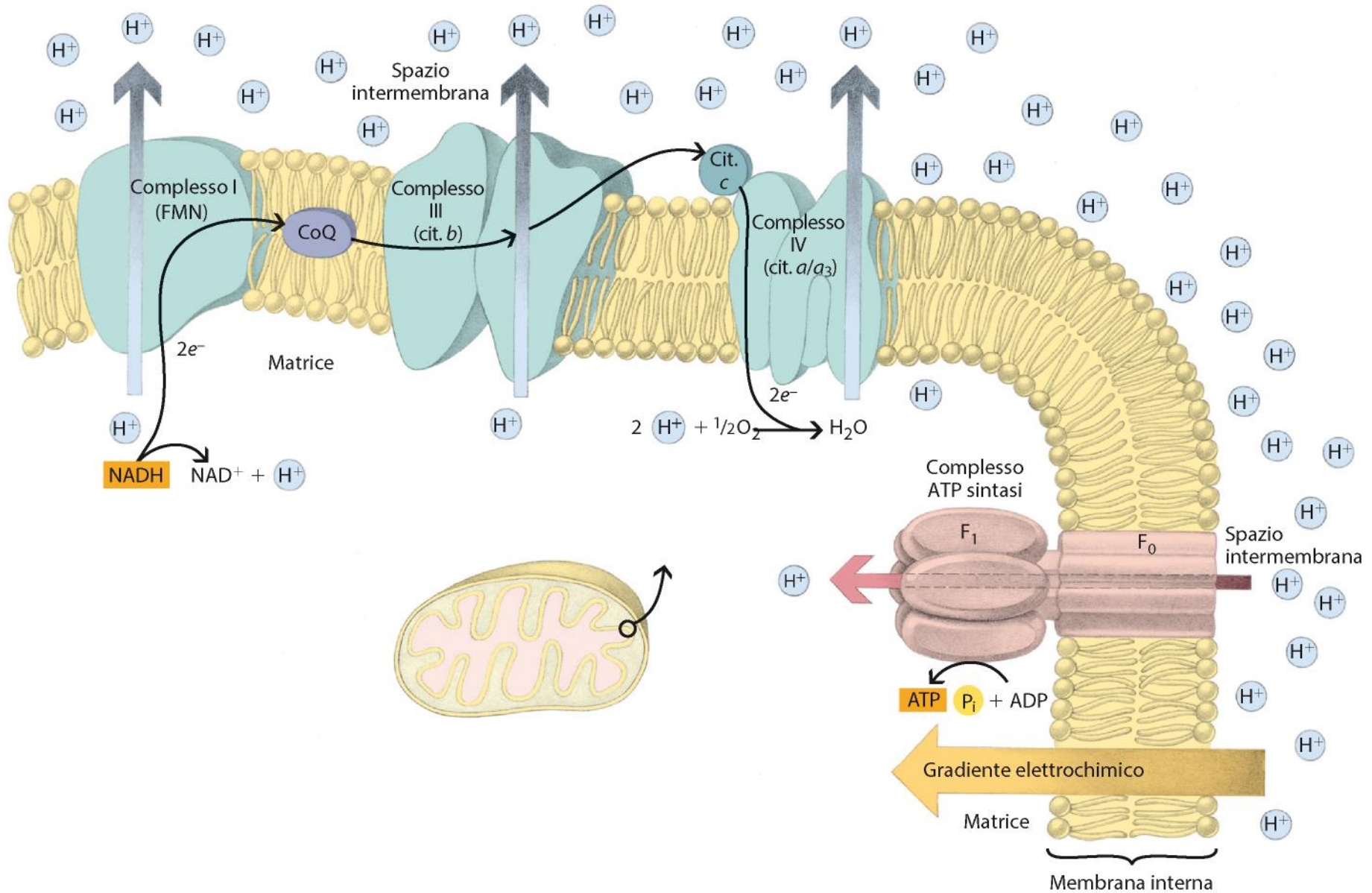


Terza tappa: TRASPORTO  
ELETTRONICO MITOCONDRIALE o  
FOSFORILAZIONE OSSIDATIVA

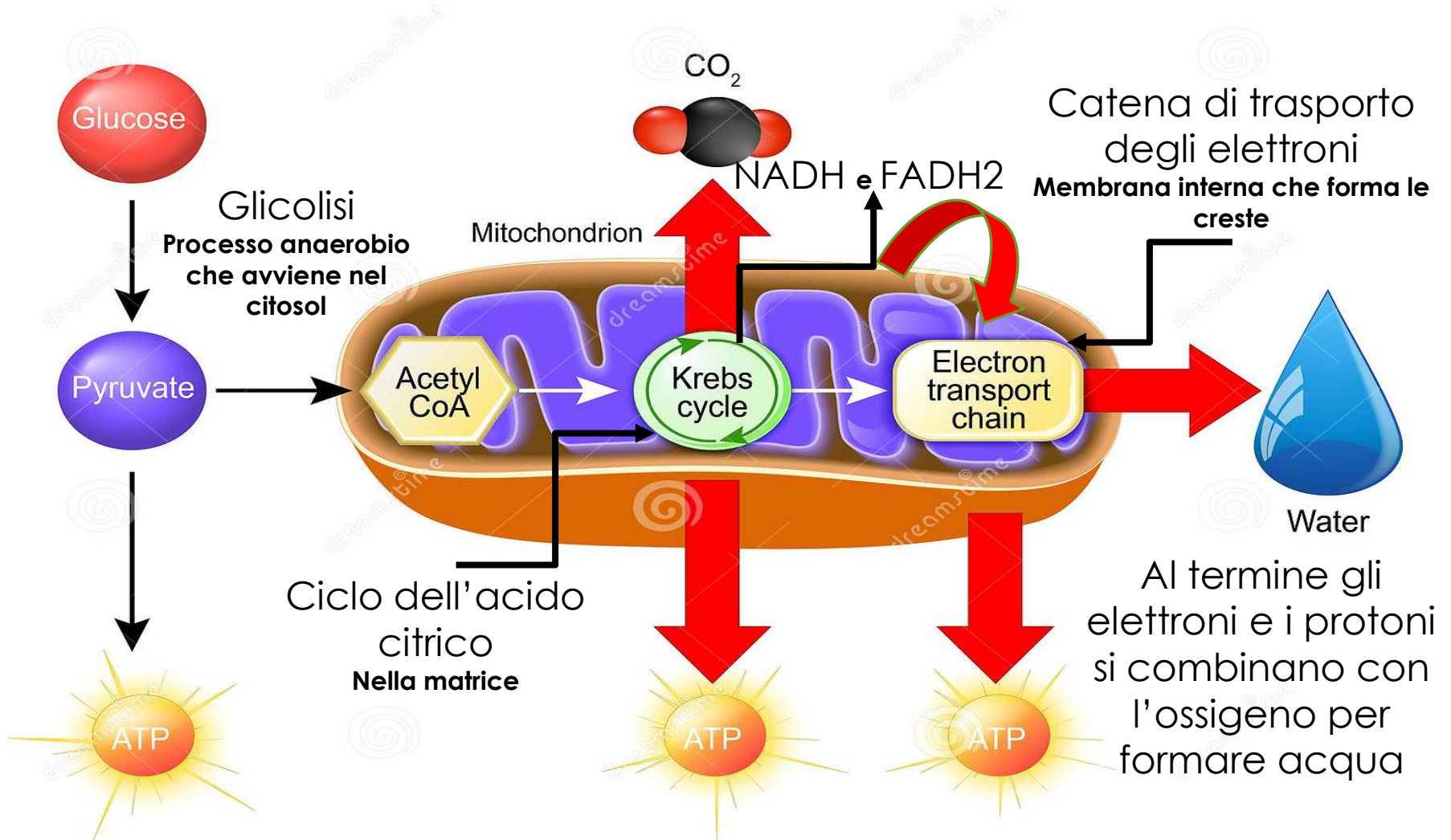
# Catena di trasporto degli elettroni



# Produzione ATP



# Aerobic respiration

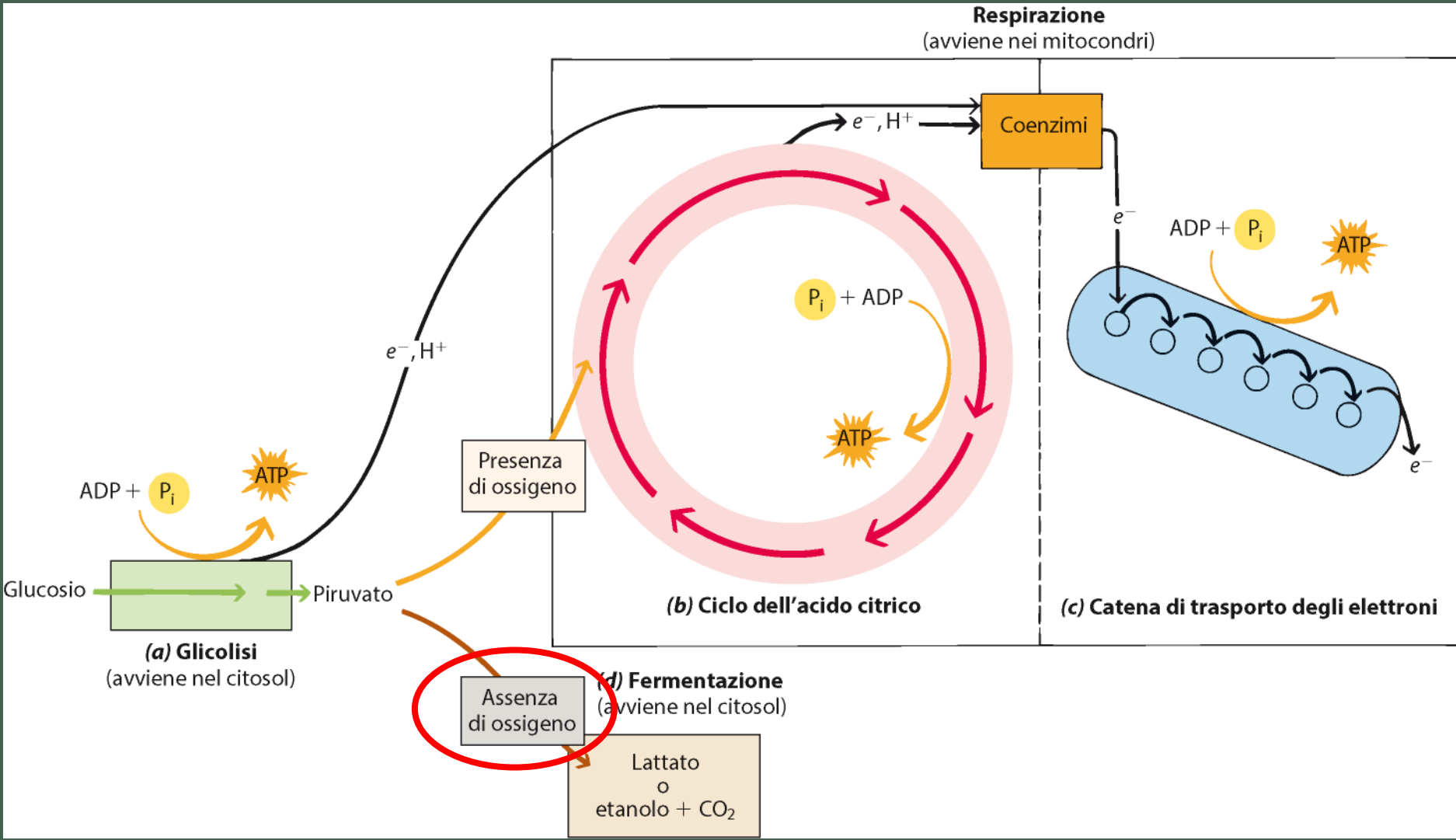


# BILANCIO ENERGETICO DELL'OSSIDAZIONE DEL GLUCOSIO

## Molecole prodotte:

	Citosol	Matrice del mitocondrio	Trasporto elettronico e fosforilazione ossidativa	
Glicolisi	2 ATP 2 NADH			→ 2 ATP → 4 ATP (rendimento netto)
Conversione del piruvato ad acetil CoA		2 × (1 NADH)	→ 2 × (3 ATP)	→ 6 ATP
Ciclo dell'acido citrico		2 × (1 ATP) 2 × (3 NADH) 2 × (1 FADH <sub>2</sub> )	→ 2 × (9 ATP) → 2 × (2 ATP)	→ 2 ATP → 18 ATP → 4 ATP

**Totale: 36 ATP**



# Fermentazione

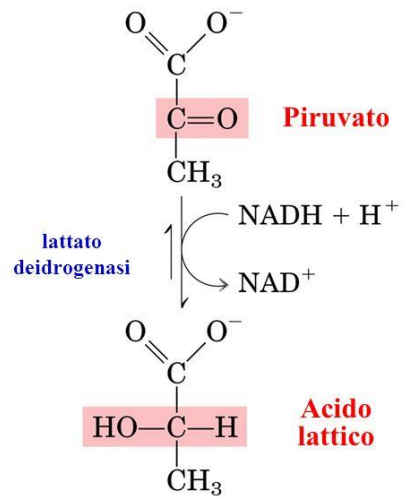
## LA FERMENTAZIONE

L'assenza di  $O_2$ , l' $NADH$  prodotto nella glicolisi può essere riossidato a  $NAD^+$  attraverso la riduzione dell'acido piruvico o di un suo derivato, con formazione di acidi e  $CO_2$ .

Tale processo è detto fermentazione (produrre un'effervescenza) e ad esso è associata la produzione di ATP.

Microrganismi anaerobi facoltativi, anaerobi obbligati e anaerobi aerotolleranti possono metabolizzare l'acido piruvico con formazione di diversi tipi di composti.

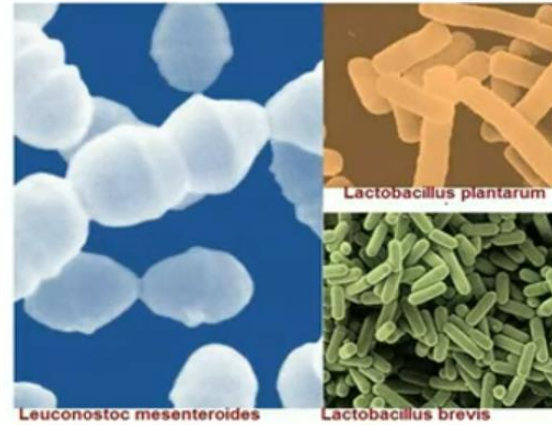
# Fermentazione lattica



# Fermentazione



## LATTICA



### Come si forma l'acido lattico?



# FERMENTAZIONE LATTICA

## Fermentazione omolattica ed eterolattica

L'acido lattico è prodotto dal piruvato mediante l'azione della lattico deidrogenasi per rigenerare il piridin nucleotide necessario per la degradazione dei carboidrati

I batteri lattici omofermentanti lo producono in quantità superiori all'85% mentre negli eterofermentanti oltre ad acido lattico è prodotta  $\text{CO}_2$ , acido acetico o acetaldeide ed etanolo.

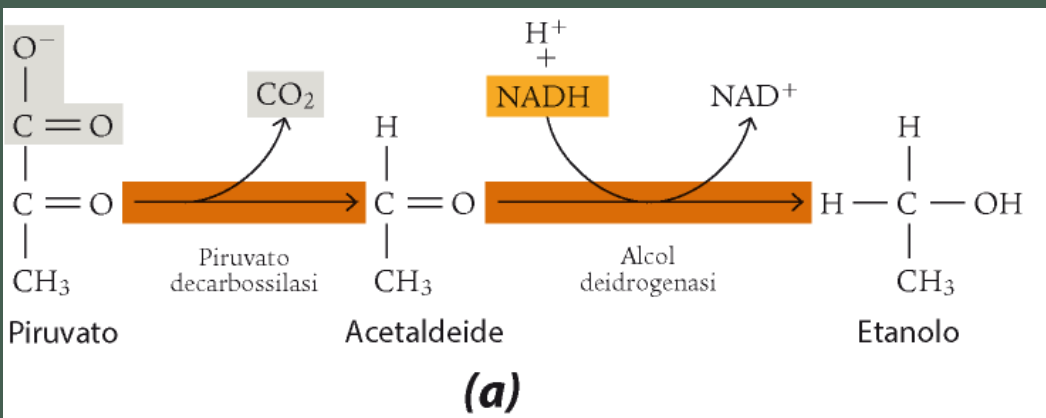
Muffe, batteri, alghe, protozoi, animali con muscoli scheletrici possono effettuare tale processo.

Fermentazione lattica:

Omolattica: via glicolitica, acido piruvico ridotto ad acido lattico .

Eterolattica: via glicolitica, acido piruvico ridotto ad acido lattico, etanolo e  $\text{CO}_2$  o acido lattico, acido acetico e  $\text{CO}_2$

# Fermentazione



## ALCOOLICA



*Saccharomyces cerevisiae*



I LIEVITI: *Saccharomyces cerevisiae*

Per la produzione della birra si usano cariossidi di orzo, ricche di amido, che *S. cerevisiae* non è in grado di metabolizzare.

E' necessaria l'amilasi, enzima prodotto dalle cariossidi durante la germinazione, che scinde l'amido in zuccheri semplici.

Il lievito trasforma lo zucchero in etanolo (**fermentazione alcolica**).

Per la preparazione del pane si ricerca la produzione della  $\text{CO}_2$  che rende il pane spugnoso e soffice. Il lievito si nutre degli zuccheri presenti nella farina.

L'alcol prodotto evapora durante la cottura.

