

Il ciclo del carbonio

Gli organismi autotrofi, tramite la fotosintesi o la chemiosintesi, trasformano l'anidride carbonica, assorbita dall'atmosfera, in composti organici che durante la respirazione, vengono scissi di nuovo in CO₂ ed H₂O.

Questi processi costituiscono il

CICLO del CARBONIO.

Gli organismi fotosintetizzanti sono le piante terrestri, il fitoplancton, le alghe marine e di acqua dolce e i cianobatteri.

Questi sintetizzano carboidrati a partire da CO₂ ed H₂O liberando O₂ nell'atmosfera.

Fase cellulare del ciclo del carbonio

Ogni anno circa 200 miliardi di tonnellate di CO_2 vengono convertite in carbonio organico

40% ad opera del fitoplancton



Una parte dei carboidrati prodotti viene utilizzata direttamente dagli stessi organismi fotosintetici, un'altra viene utilizzata dagli organismi ETEROTROFI.

Quindi parte del carbonio immagazzinato nei tessuti vegetali viene ceduto agli animali che si cibano di piante; nell'organismo degli animali erbivori i composti organici del carbonio vengono degradati, ricombinati e in parte utilizzati come fonte di energia.

La maggior parte del carbonio organico si trova quindi nei resti delle piante e degli animali morti. Questi si depositano sul suolo o sul fondo degli oceani dove vengono attaccati e demoliti dagli organismi decompositori ossia da piccoli invertebrati, batteri e funghi.

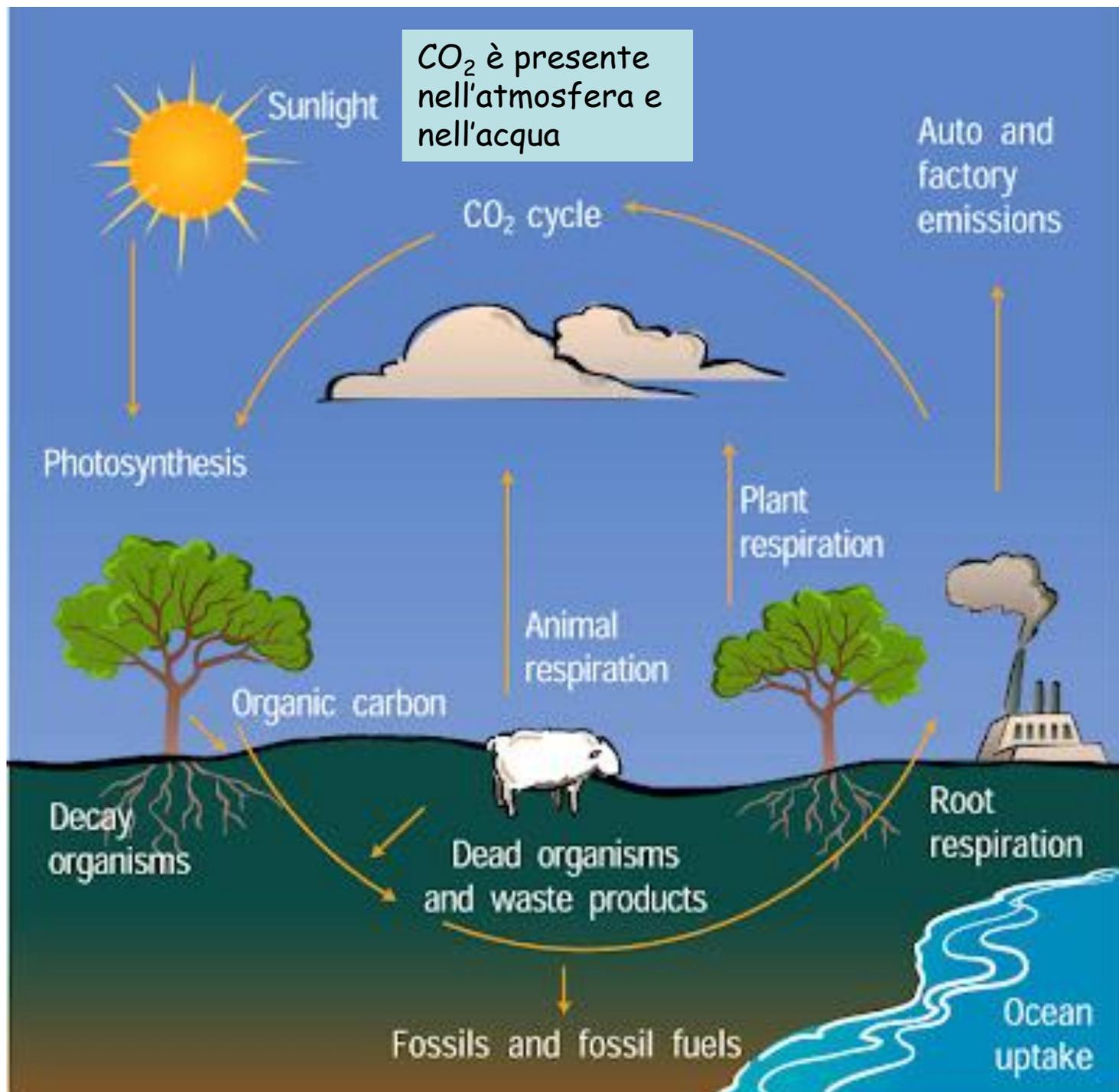
In altre parole:

quando le piante e gli animali muoiono, i loro tessuti e cellule vengono attaccate da batteri e funghi saprofiti che decompongono la materia organica (e quindi anche i composti del carbonio), liberando gli elementi che la costituiscono che ritornano in atmosfera.

Il C sotto forma di CO_2 , ritorna nuovamente disponibile per le piante.

Una grande quantità di carbonio è presente sotto forma di calcare (carbonato di calcio). Questo carbonio entra nel ciclo quando i depositi di calcare vengono esposti ad azione erosiva (es. esposizione all'atmosfera in seguito ad attività sismica).

Un altro grande accumulo di carbonio si trova nelle viscere della terra sotto forma di carbone o petrolio, depositato circa 300 milioni di anni fa.



Gli organismi autotrofi sono quindi in grado di sintetizzare molecole organiche, utilizzando energia e composti inorganici.

Gli autotrofi fotosintetici utilizzano l'energia solare e gli organismi chemioautotrofi ricavano l'energia dall'ossidazione di composti inorganici ridotti.

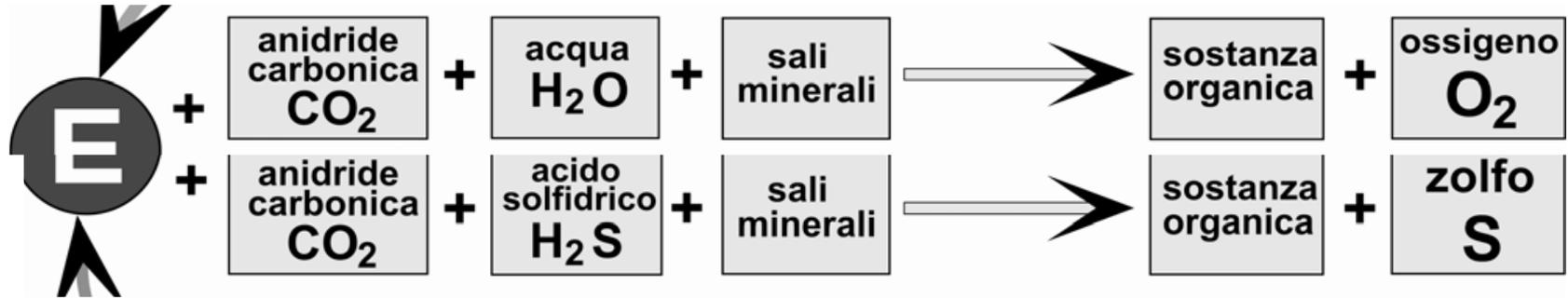
| | Autotrofi | Eterotrofi |
|------------------------------------|--|--|
| Fonte di energia | Energia solare o energia derivante da reazioni chimiche | Carboidrati, proteine e lipidi |
| Fonte del materiale da costruzione | Composti inorganici | Composti organici |
| Organismi | Piante Alghe Cianobatteri Batteri fotosintetici e chemiosintetici | Animali Funghi Piante parassite Batteri |

Rafflesia arnoldii è una pianta parassita



Energia
luminosa

Fotoautotrofi



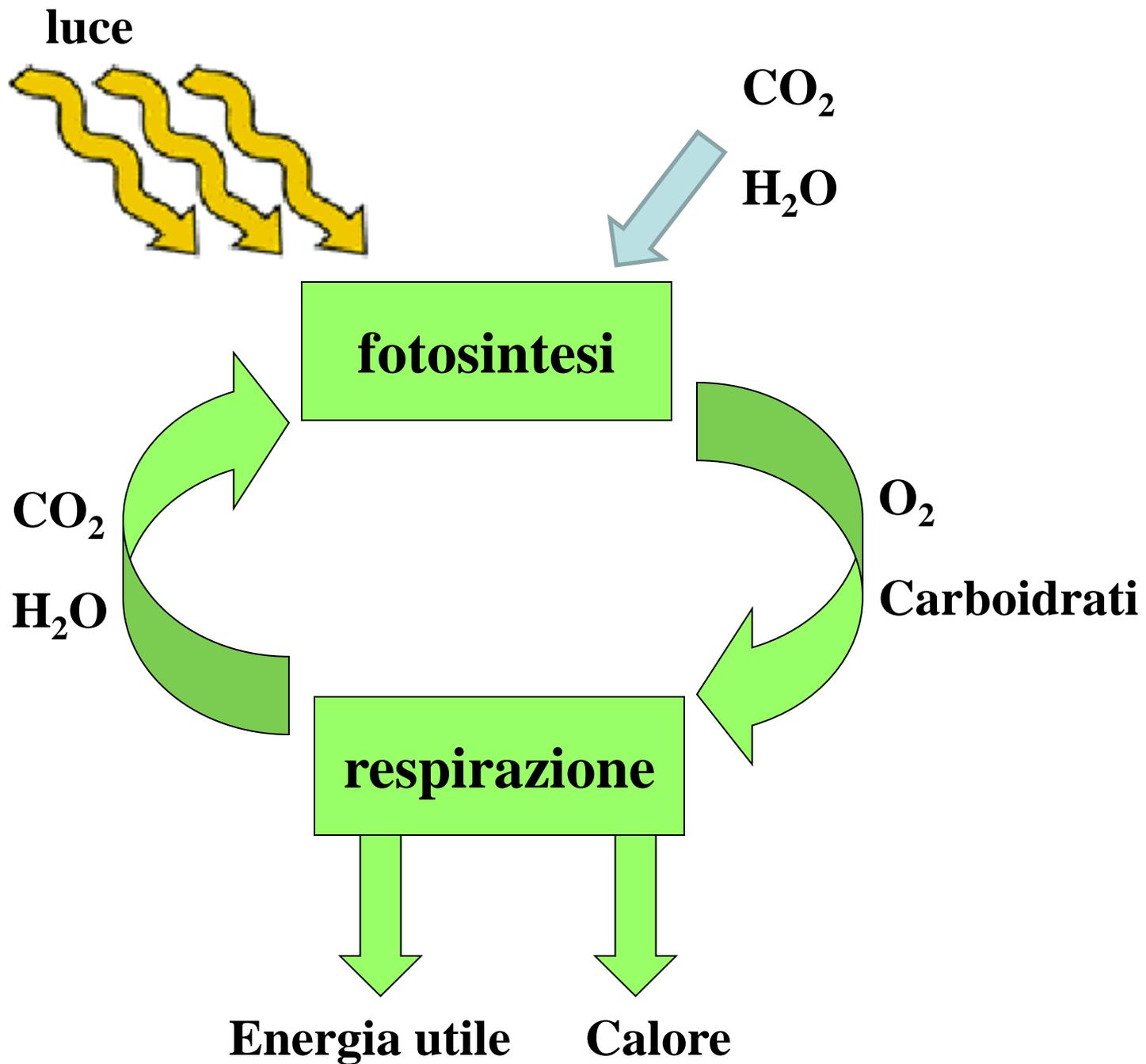
Energia liberata
dall'ossidazione di
composti dell'azoto,
zolfo, ferro.

Chemoautotrofi

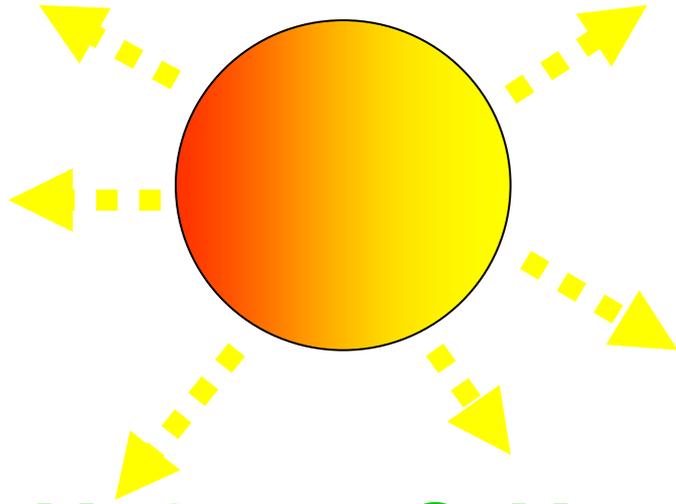
Queste reazioni sono reazioni di
trasformazione dell'energia

Principali Processi Biologici di Trasformazione dell'Energia

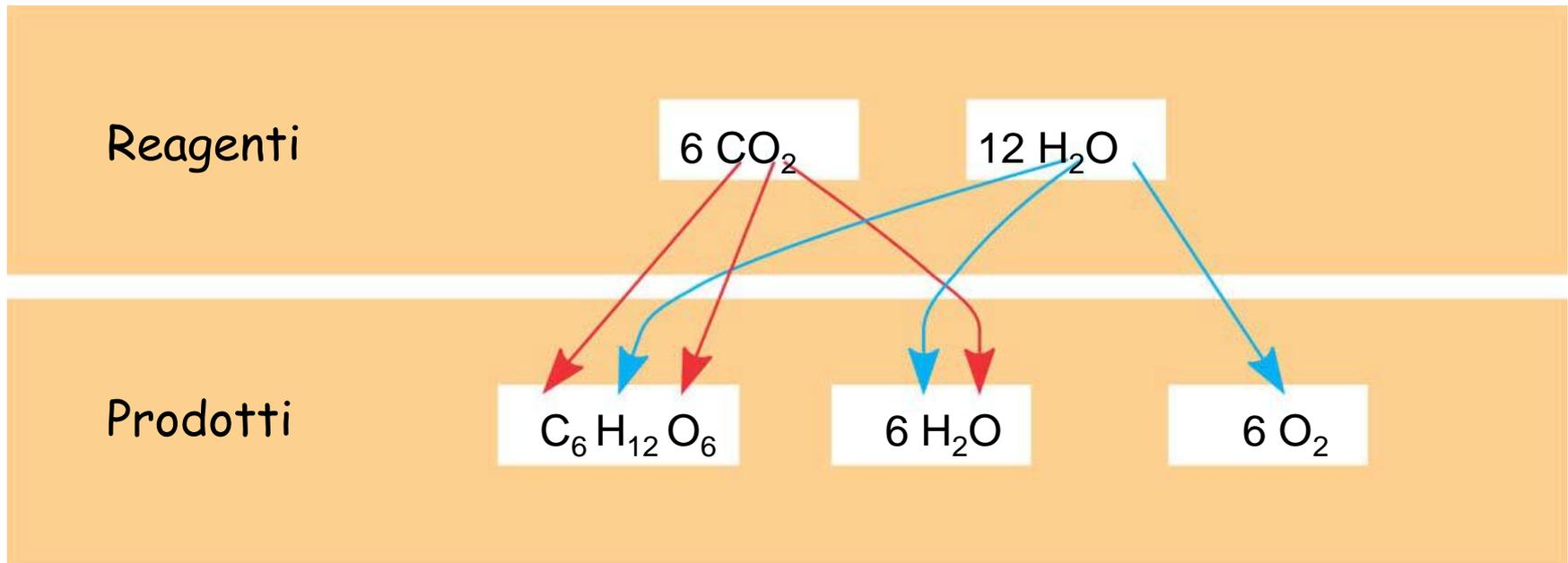
- Fotosintesi
- Chemiosintesi
- Respirazione Cellulare
- Fermentazione



Equazione Generale della Fotosintesi



La fotosintesi è un processo di ossido-riduzione



Ricordo che:

Un atomo si riduce quando acquista elettroni.

Un atomo si ossida quando perde elettroni.

Una riduzione è una reazione che diminuisce la carica positiva di un atomo.

Un'ossidazione aumenta la carica positiva di un atomo.

Potere riducente: capacità di una molecola di ridurre un'altra molecola e quindi di ossidarsi.

In genere le molecole che sono presenti nell'ambiente sono nello stato ossidato, la maggior parte delle molecole presenti negli organismi sono ridotti.

Questa proprietà è importante per le piante perché assorbono CO_2 ed H_2O , molecole in cui il C, che ha ceduto e^- all' O_2 , e l'H che li ha ceduti all' O_2 , sono nella forma ossidata, e le trasformano in composti in cui il C e l'H sono presenti in forma ridotta (carboidrati).

Quindi il C della CO_2 e l'H dell' H_2O hanno un forte potere riducente perché sono in grado di cedere e^- .

Ricapitolando:

Ossidante è un atomo in grado di acquistare e^- , quindi si riduce;

Riducente invece è un atomo che cede e^- e si ossida.

Quindi per facilitare il movimento di e^- è conveniente utilizzare piccole molecole poco stabili e mobili

2 piccole molecole maggiormente utilizzate per trasferire elettroni sono il **NAD⁺** (nicotinamide adenin dinucleotide) e **NADP⁺** (nicotinamide adenin dinucleotide fosfato).

NAD⁺ e NADP⁺ , acquistano e- facilmente, sono dette agenti ossidanti perché ossidano un'altra molecola e **si riducono in** NADH e NADPH che sono forti agenti riducenti.

Queste molecole trasportatrici di e⁻ vengono utilizzate anche migliaia di volte al secondo dalle cellule.

Altre molecole coinvolte nel trasporto degli elettroni:

Citocromi - proteine contenenti il gruppo eme che lega un atomo di Fe responsabile del trasporto dell'e⁻. Sono proteine inserite nelle membrane tilacoidali e possono trasferire elettroni solo tra molecole molto vicine.

Plastochinoni - molecole di chinone che trasportano e⁻ per breve distanze, sono legati alle membrane

Plastocianina - proteina che trasporta e⁻ mediante il Cu. La plastocianina non è inserita nelle membrane ma si può spostare per brevi tratti sulla superficie delle membrane.

La FOTOSINTESI E' IL PROCESSO PIU' GROSSO CHE CI SIA SULLA TERRA

- Ogni anno trasforma in composti organici **200 miliardi di tonnellate** di carbonio inorganico!!!
- Il processo implica un altrettanto **colossale trasferimento di energia dal Sole alla Terra.**

La quantità di energia solare catturata dalla fotosintesi è immensa, dell'ordine dei 100 TW (terawatt) all'anno, che è circa sei volte quanto consumano attualmente tutti gli uomini sulla terra (14 TW all'anno)

La fotosintesi è il processo che converte biologicamente l'energia luminosa in energia chimica, mediante una serie di reazioni che hanno luogo nei cloroplasti e coinvolgono numerosi pigmenti.

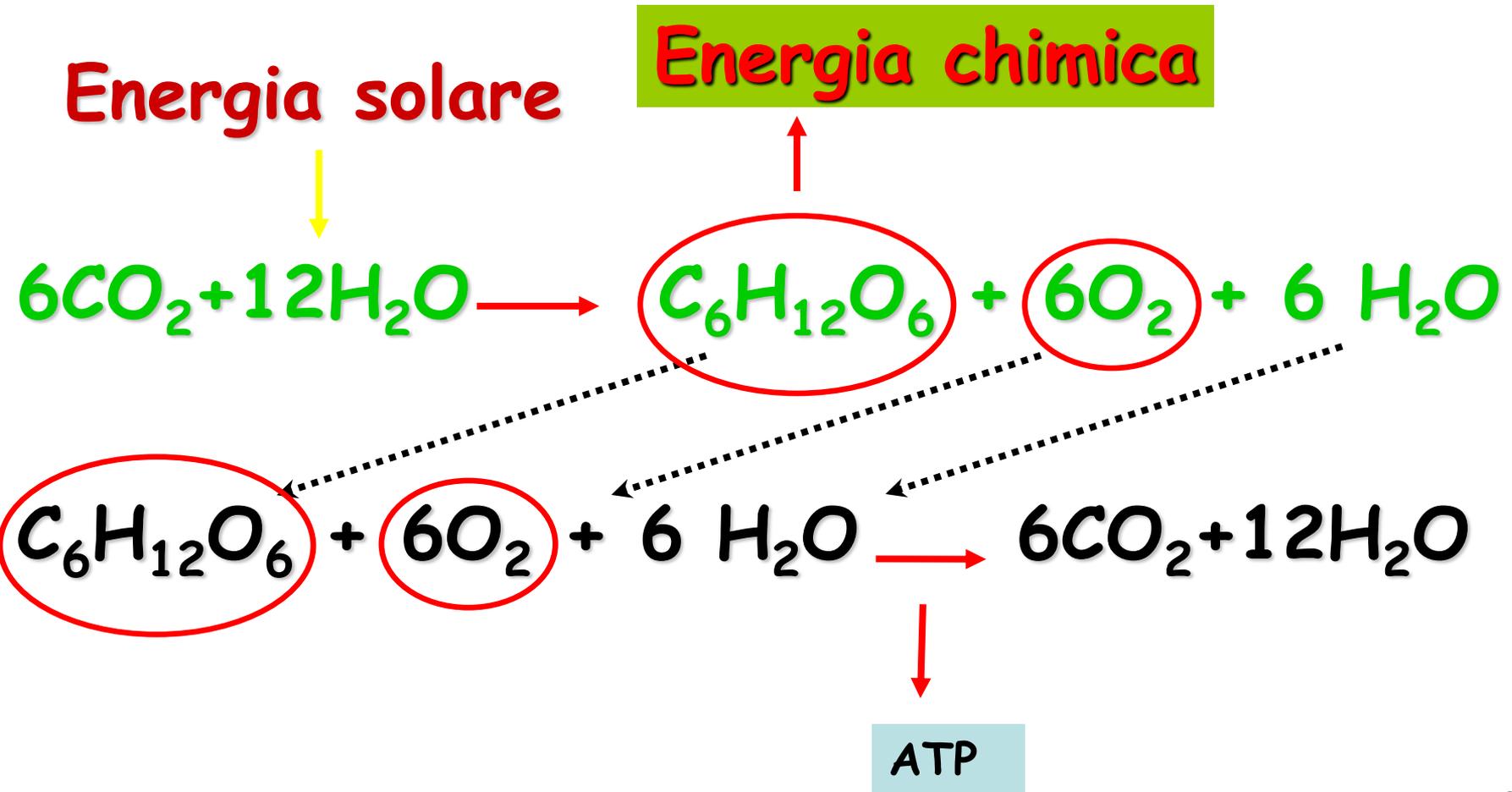
Con questo processo vengono anche sintetizzate molecole di ATP e NADPH. La molecola di ATP ha legami ad elevata energia potenziale.

| | Fonte d'energia | Sito |
|--|--|-------------|
| Fotofosforilazione (fotosintesi) | Luce solare | Cloroplasti |
| Fosforilazione a livello del substrato (glicolisi) | Reazioni che non richiedono l'ossigeno | Citosol |
| Fosforilazione ossidativa (respirazione-catena di trasporto degli elettroni) | Ossidazioni in presenza di ossigeno | Mitocondri |

Processi che portano alla produzione di ATP.

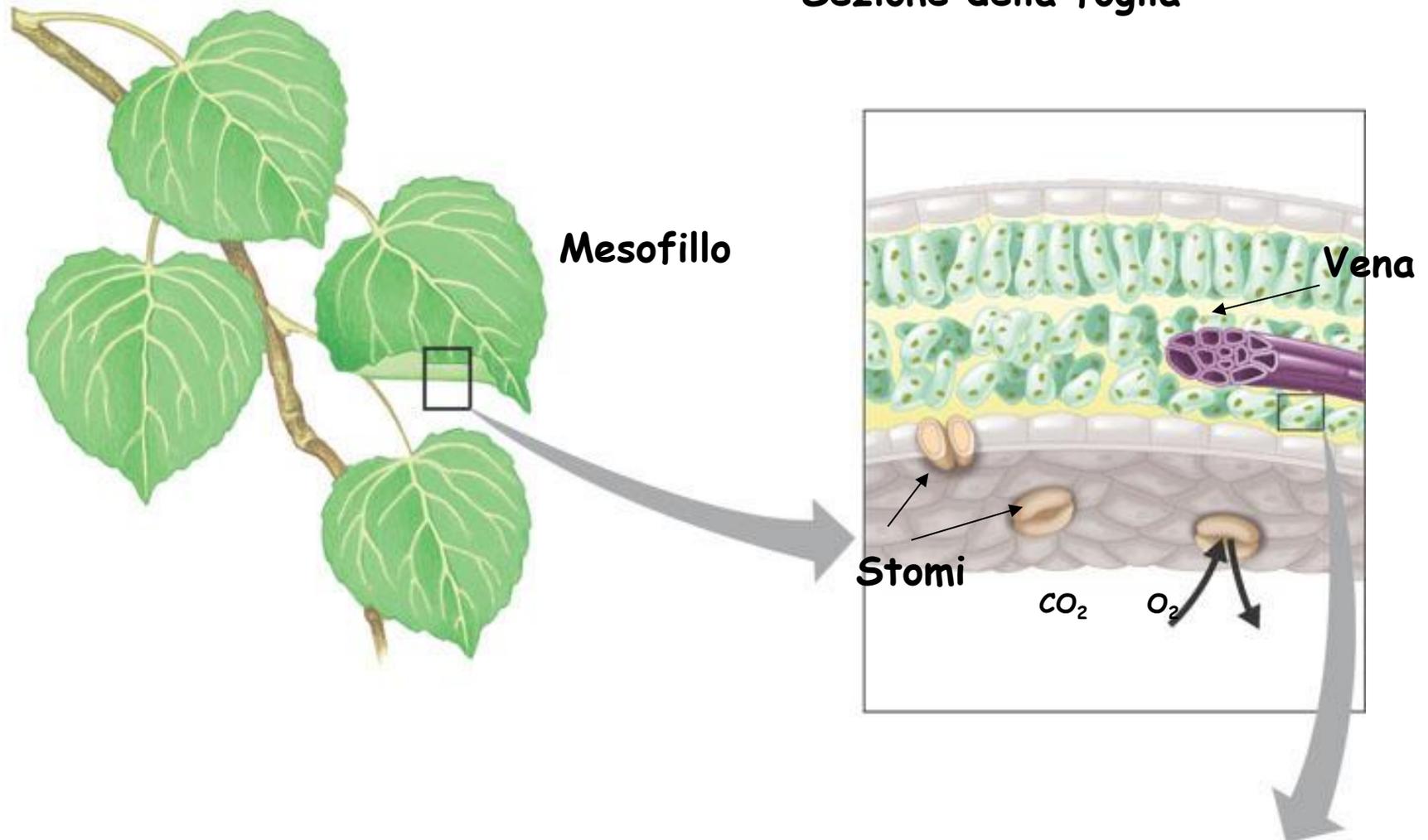
Fotosintesi e Respirazione

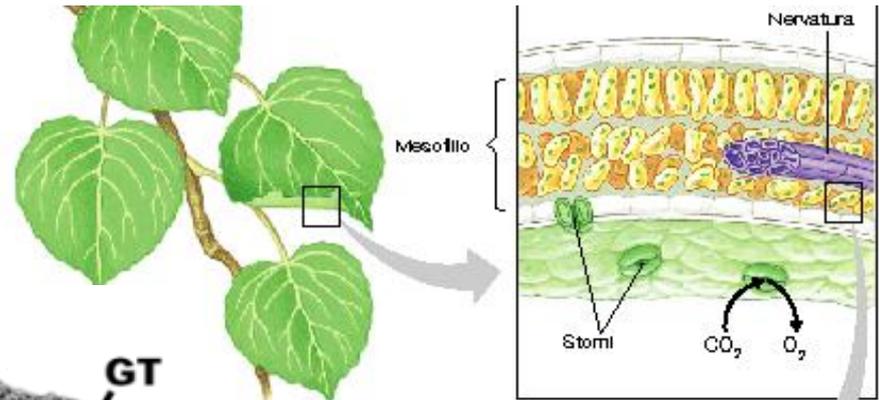
sono in connessione



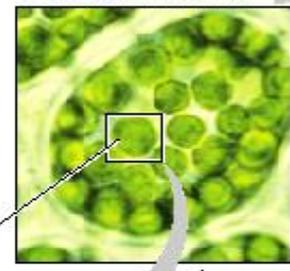
Le foglie sono il sito principale del processo di fotosintesi

Sezione della foglia

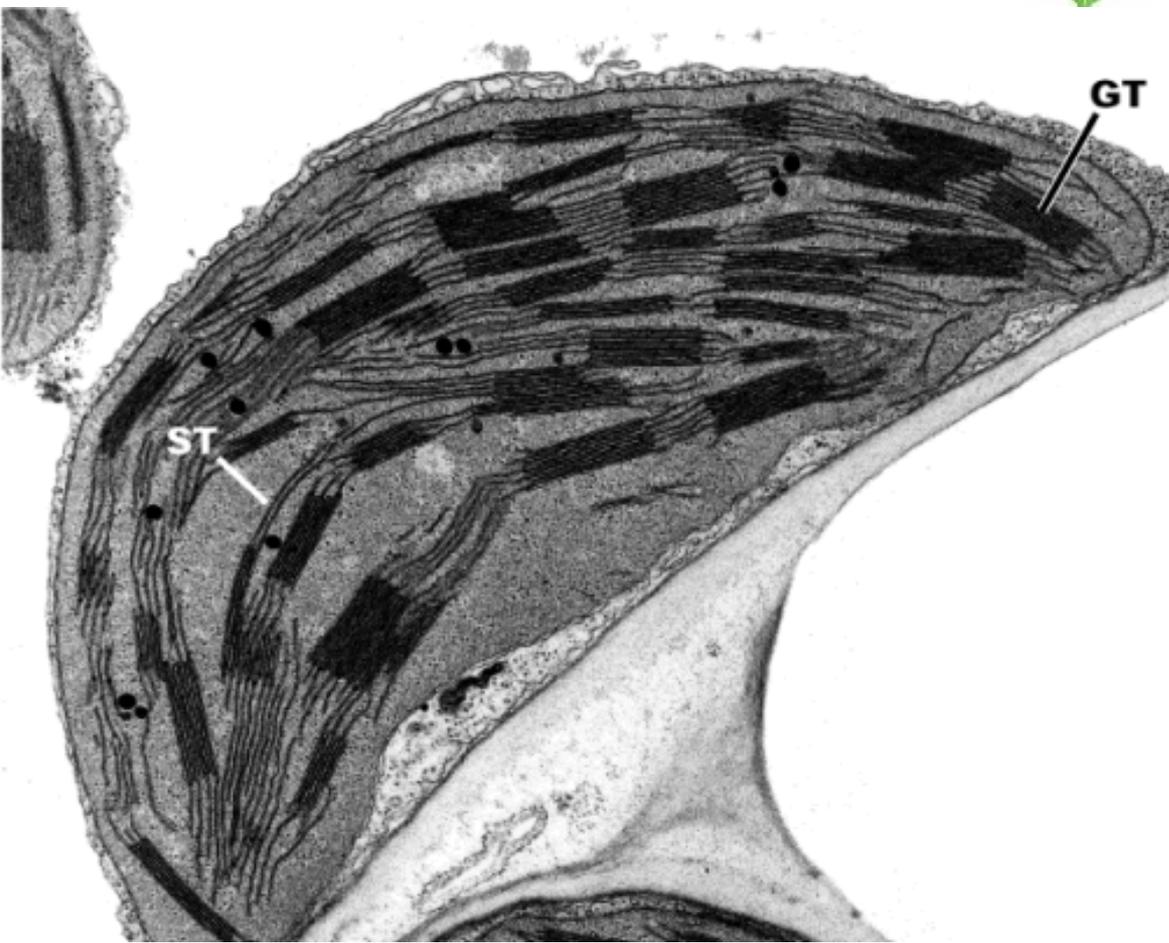
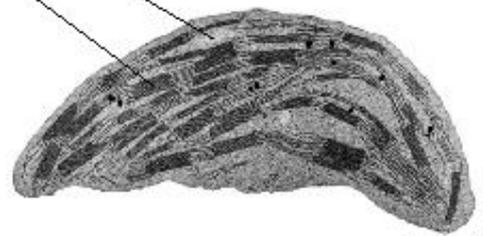
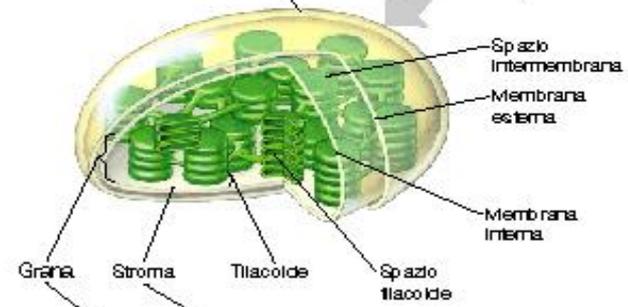




Cellula del mesofillo



Cloroplasto





Foglie di una pianta acquatica (*Elodea*) con bollicine di O_2 , prodotto di scarto per la pianta.

15 μm

FOTOSINTESI

Reazioni dipendenti dalla luce

Reazioni indipendenti dalla luce

Fase luminosa

Avviene nei grana
Scinde l' H_2O
Rilascia O_2
Produce ATP ed NADPH

Ciclo di Calvin

Avviene nello stroma del cloroplasto
Produce zuccheri dalla CO_2
Consuma ATP come energia ed NADPH come potere riducente

Le reazioni che avvengono durante la fotosintesi vengono suddivise in due processi principali: **reazioni di trasduzione di energia e reazioni di fissazione del carbonio.**

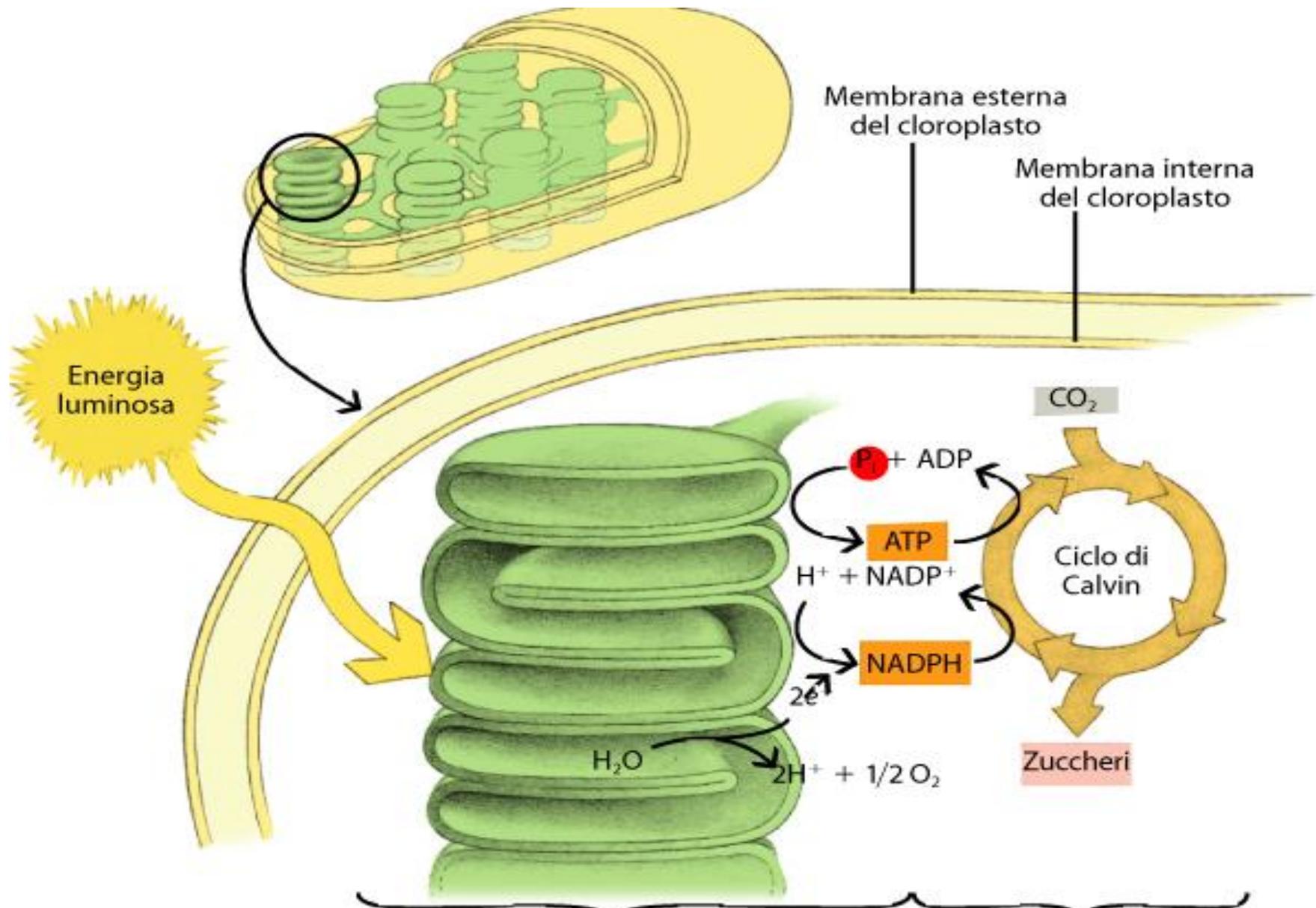
Le reazioni di trasduzione d'energia sono anche note come reazioni della **fase luminosa.**

Le reazioni di fissazione del carbonio sono reazioni che non richiedono la luce, **fase oscura.**

Durante la fase dipendente dalla luce, l'energia luminosa viene utilizzata per formare ATP da ADP e P e per ridurre molecole trasportatrici di elettroni, principalmente NADP⁺ che diventa NADPH.

L'NADPH trasferisce e⁻ anche all'interno dello stroma.

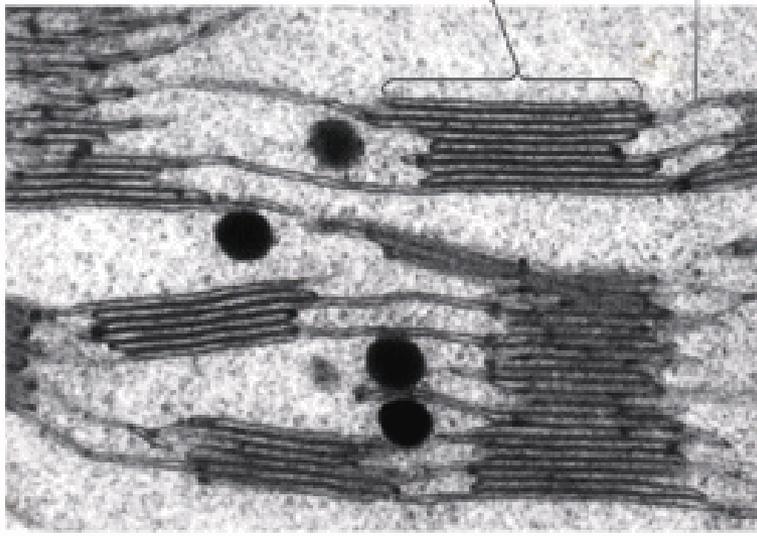
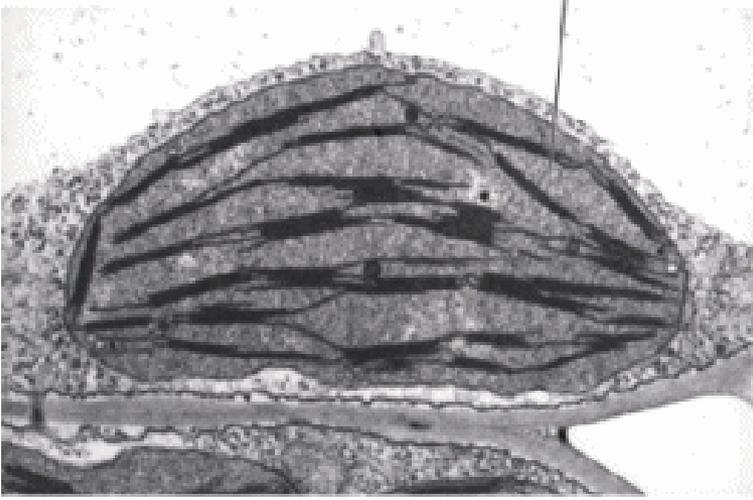
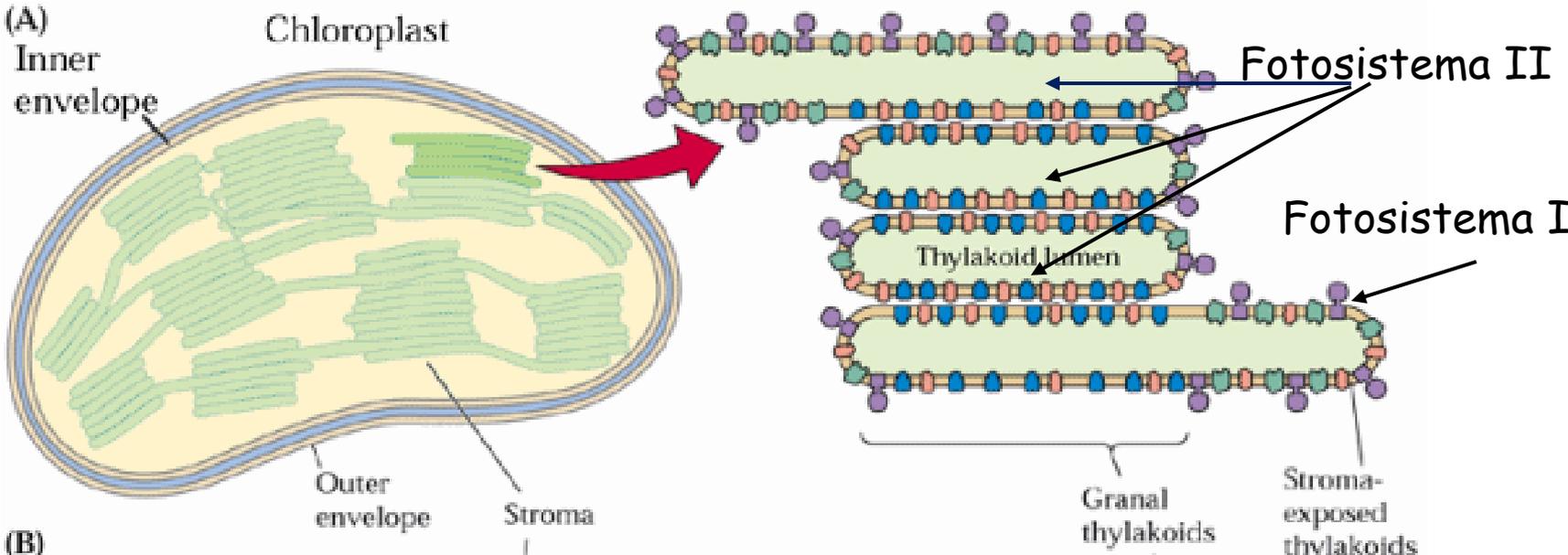
Visione d'insieme della fotosintesi



(a) Reazioni di trasduzione di energia (membrana del tilacoide)

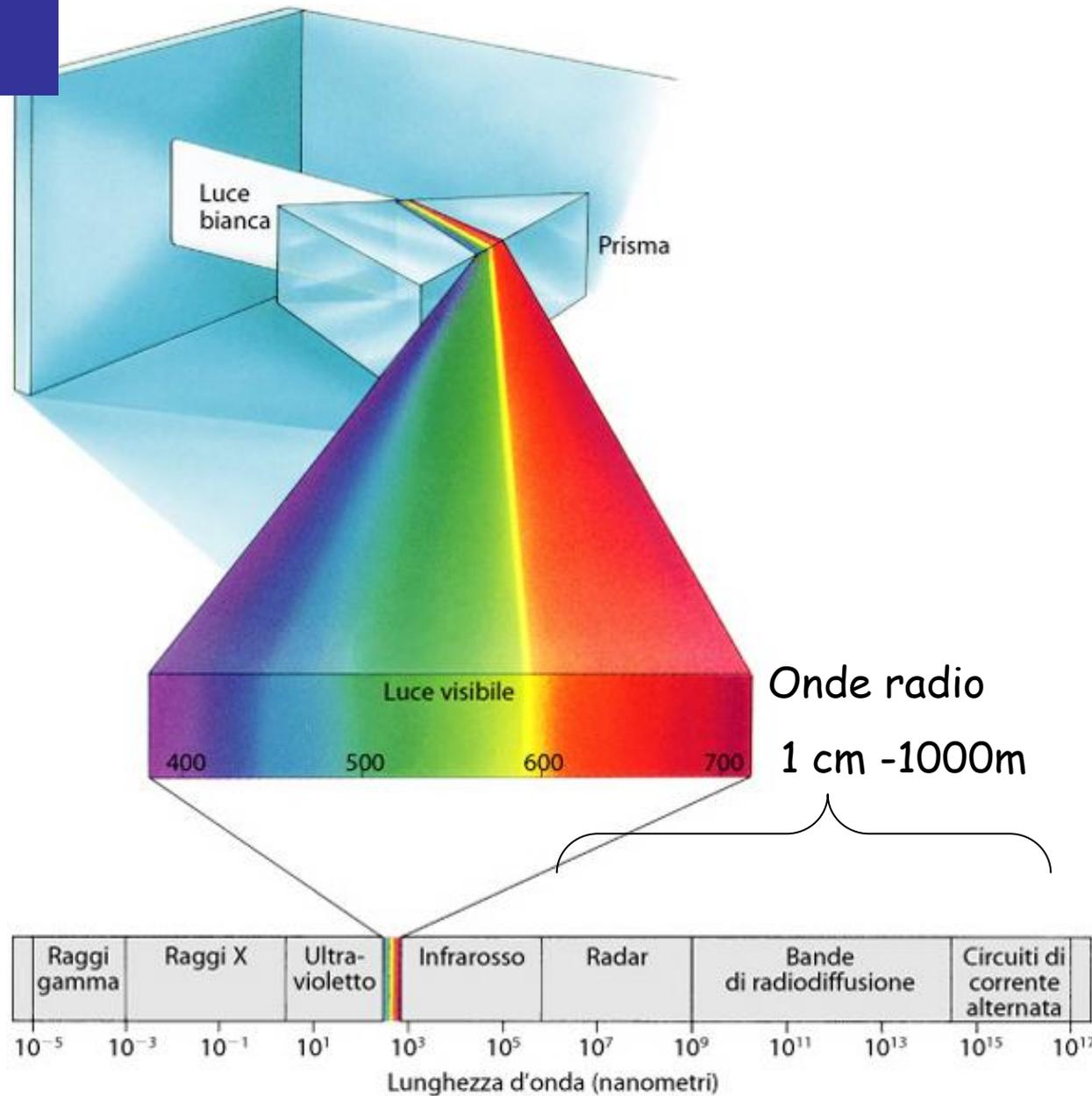
(b) Reazioni di fissazione del carbonio (stroma)

In particolare, nelle membrane granali dei tilacoidi:



Luce

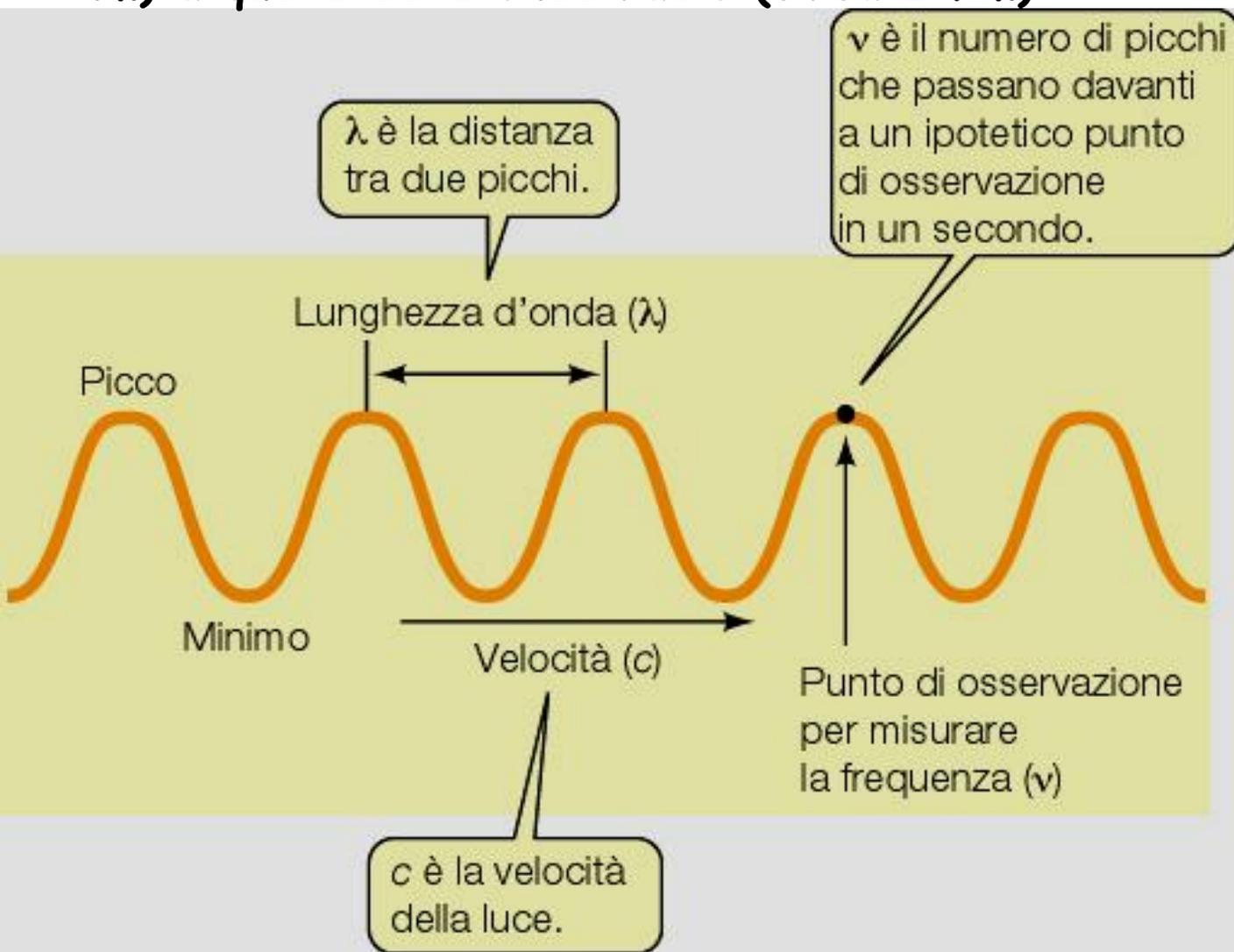
Spettro elettromagnetico



Visibile: fra 380 e 750 nm

Tutte le radiazioni luminose incluse nello spettro viaggiano sotto forma di onde.

Le lunghezze d'onda variano fra quelle dei raggi gamma (circa 1 nm) a quelle delle onde radio (circa 1 Km)



Le radiazioni di ogni lunghezza d'onda hanno una quantità di energia associata.

Più è corta la lunghezza d'onda e maggiore è l'energia ad essa associata, al contrario, a lunghezze d'onda più lunghe si associa un'energia minore.

Proprietà fisiche della luce

La luce possiede proprietà sia di particella (fotone) che di onda.

Ogni fotone contiene una determinata quantità di energia chiamata quanto. L'energia di un fotone è

$$E = h \cdot \nu$$

Un fotone è una particella priva di massa, costituente elementare della radiazione elettromagnetica, detto anche quanto di energia

h costante di Planck

Il valore di h è $6.62607015 \times 10^{-34}$ J·s.

ν Frequenza dell'onda elettromagnetica

Quindi:

La luce è costituita da particelle d'energia chiamate **FOTONI** o **QUANTI (Einstein -1905)**

- L'energia di un fotone è inversamente proporzionale alla sua lunghezza d'onda. Tanto minore è la lunghezza d'onda, tanto maggiore è l'energia del fotone

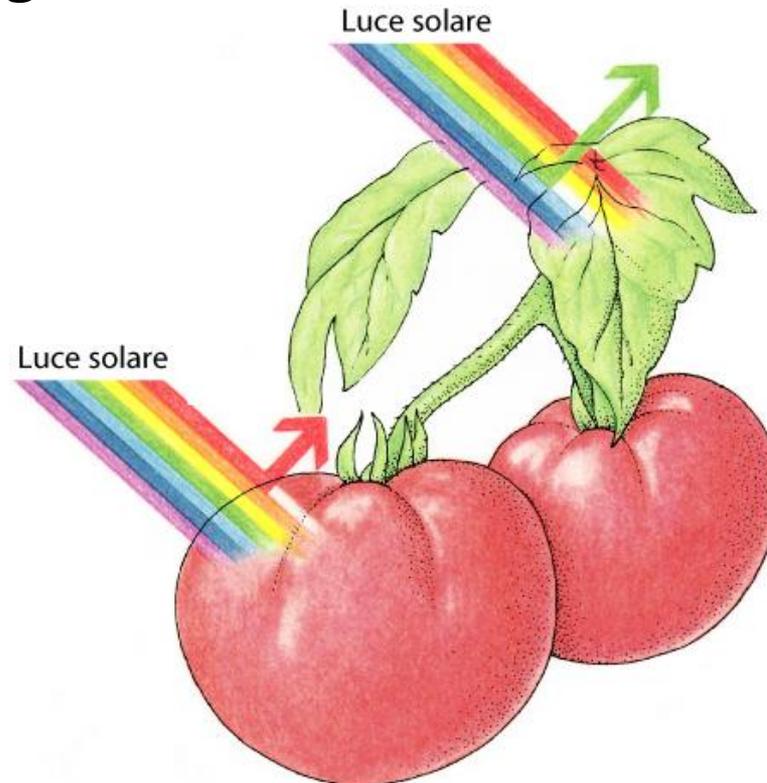
(energia = frequenza x h)

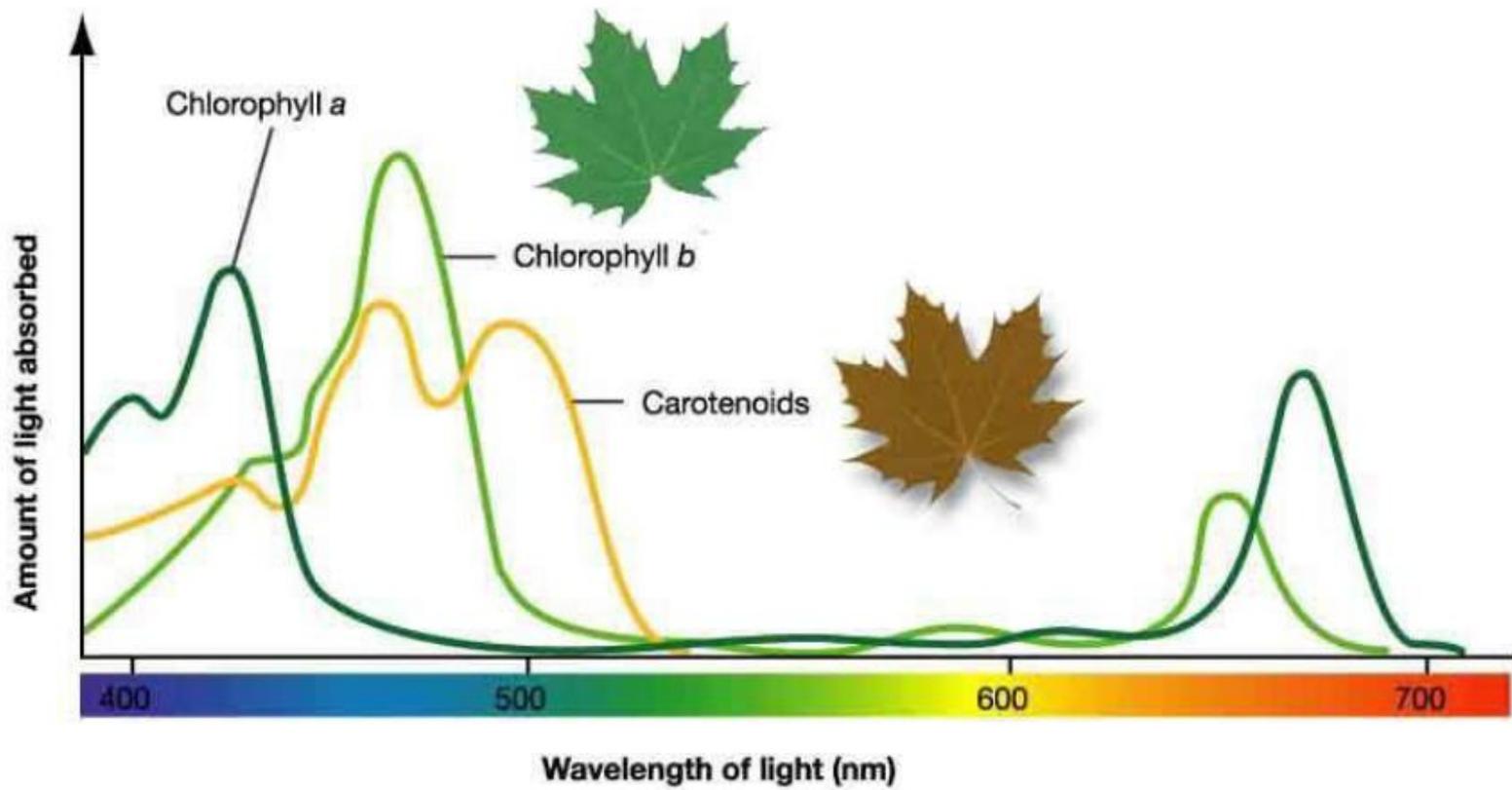
Es. I fotoni della luce violetta contengono circa il doppio dell'energia contenuta nei fotoni di luce rossa.



L'energia luminosa, affinché possa essere utilizzata dai sistemi viventi, deve essere assorbita.

Un pigmento è una molecola che assorbe luce, alcune assorbono luce di qualsiasi lunghezza d'onda e appaiono neri, ma la maggior parte assorbe la luce solo di determinate lunghezze d'onda e trasmette o riflette la luce di altre lunghezze d'onda.





Bilancio energetico di una foglia

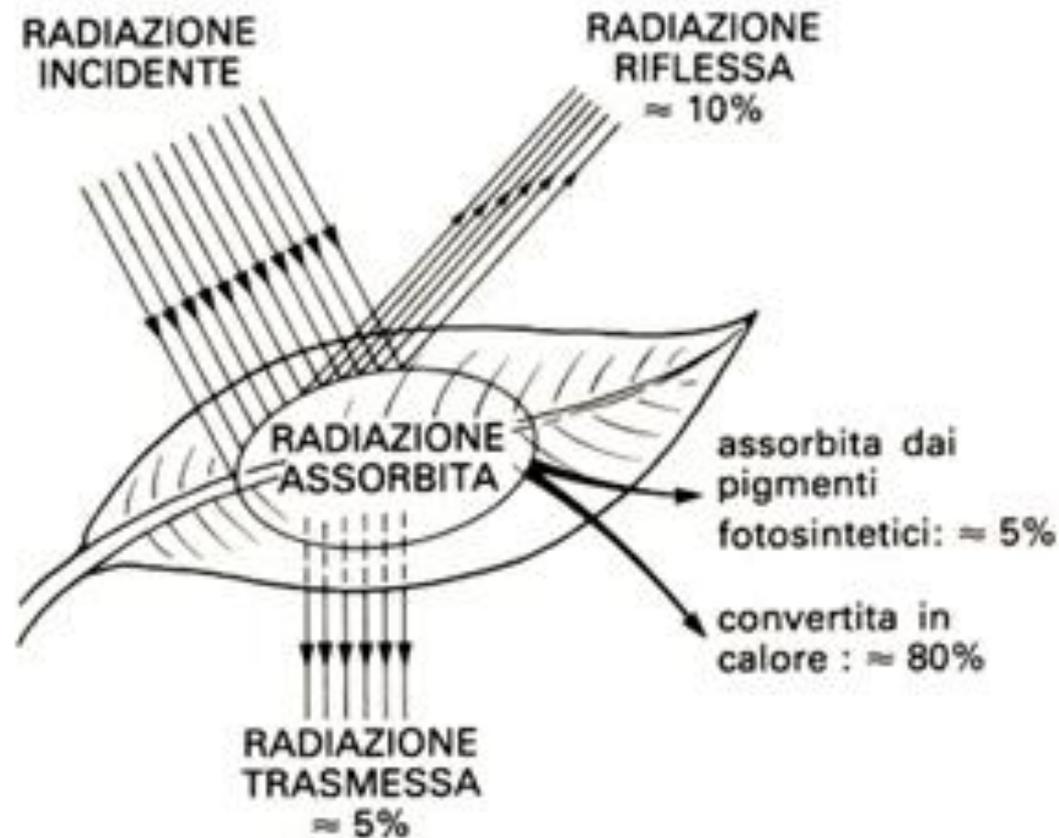
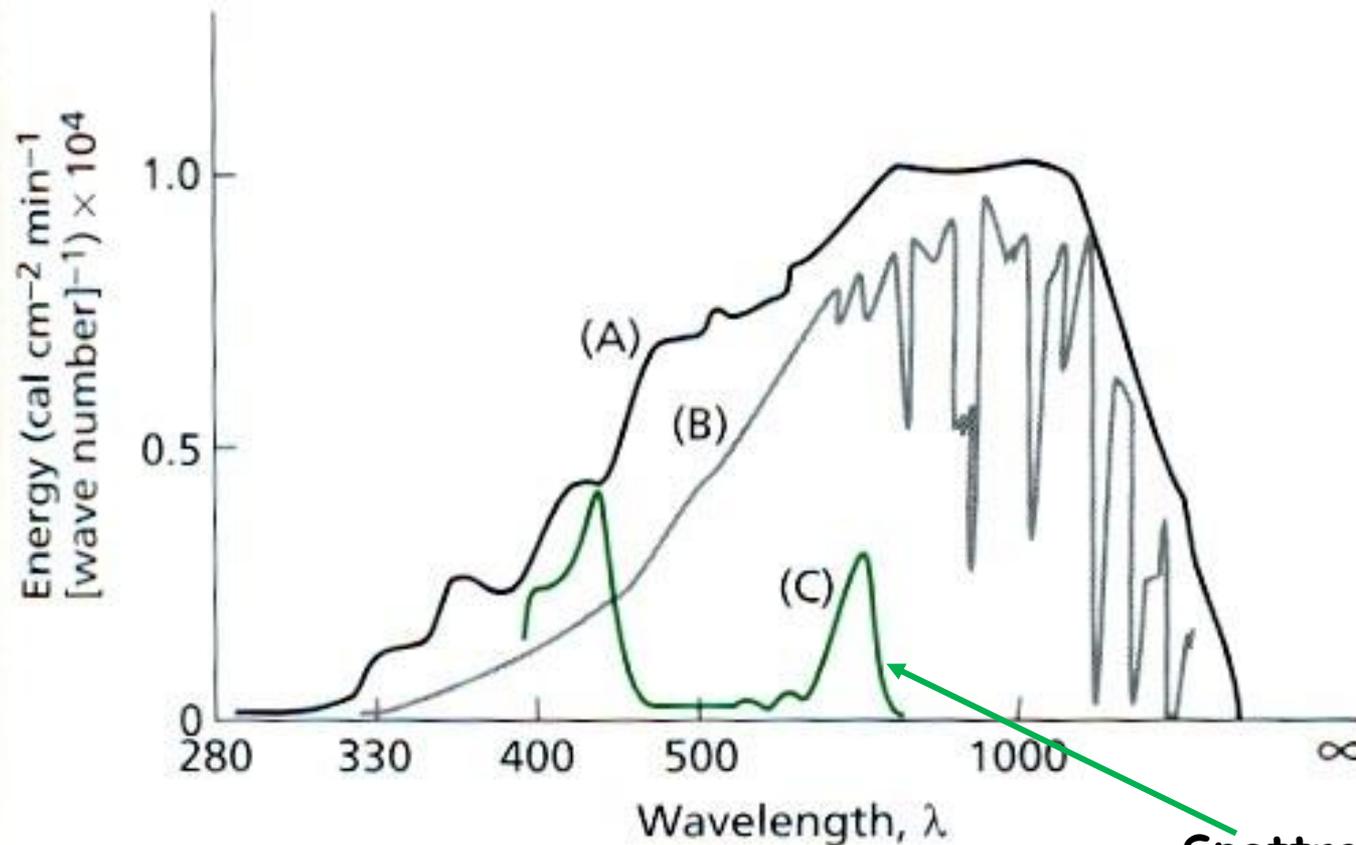


FIG. 13.31 • Solo una piccola parte dell'energia totale che incide su una foglia viene assorbita dai pigmenti dei cloroplasti e sfruttata per la fotosintesi. Nello schema sono rappresentate le principali voci del «bilancio energetico» di una foglia. I valori indicati si devono intendere come ordini di grandezza estremamente grossolani: essi possono variare entro ampi limiti.

Il sole è una sorgente di fotoni a diversa energia

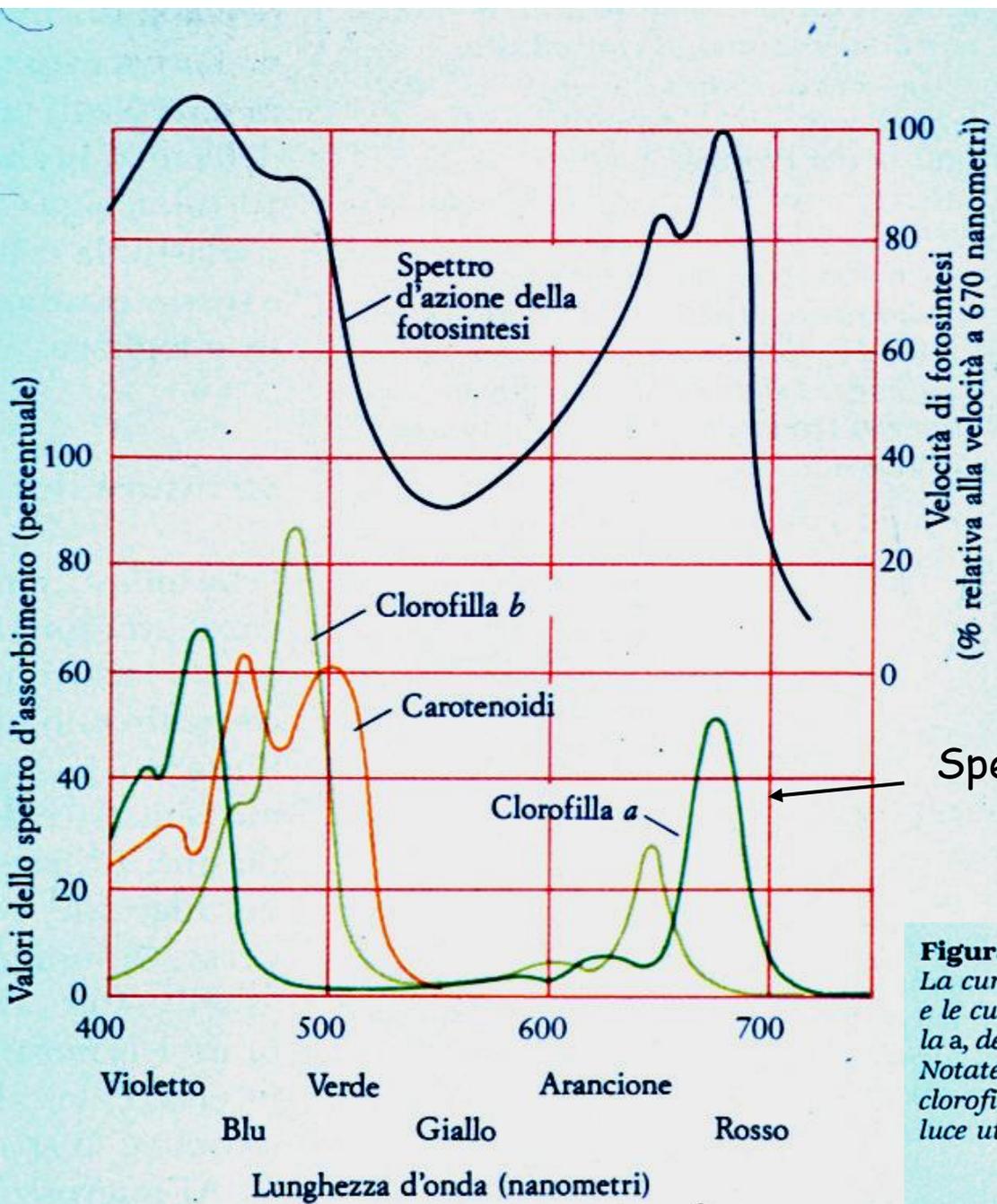


- (A) Solar output
- (B) Energy at earth's surface
- (C) Absorption of chlorophyll a

Spettro di assorbimento della clorofilla a

Il grafico dell'assorbimento della luce da parte di un pigmento è lo **spettro di assorbimento** di quel pigmento.

Lo **spettro d'azione**, mostra le lunghezze d'onda più efficienti per un determinato processo fotochimico.

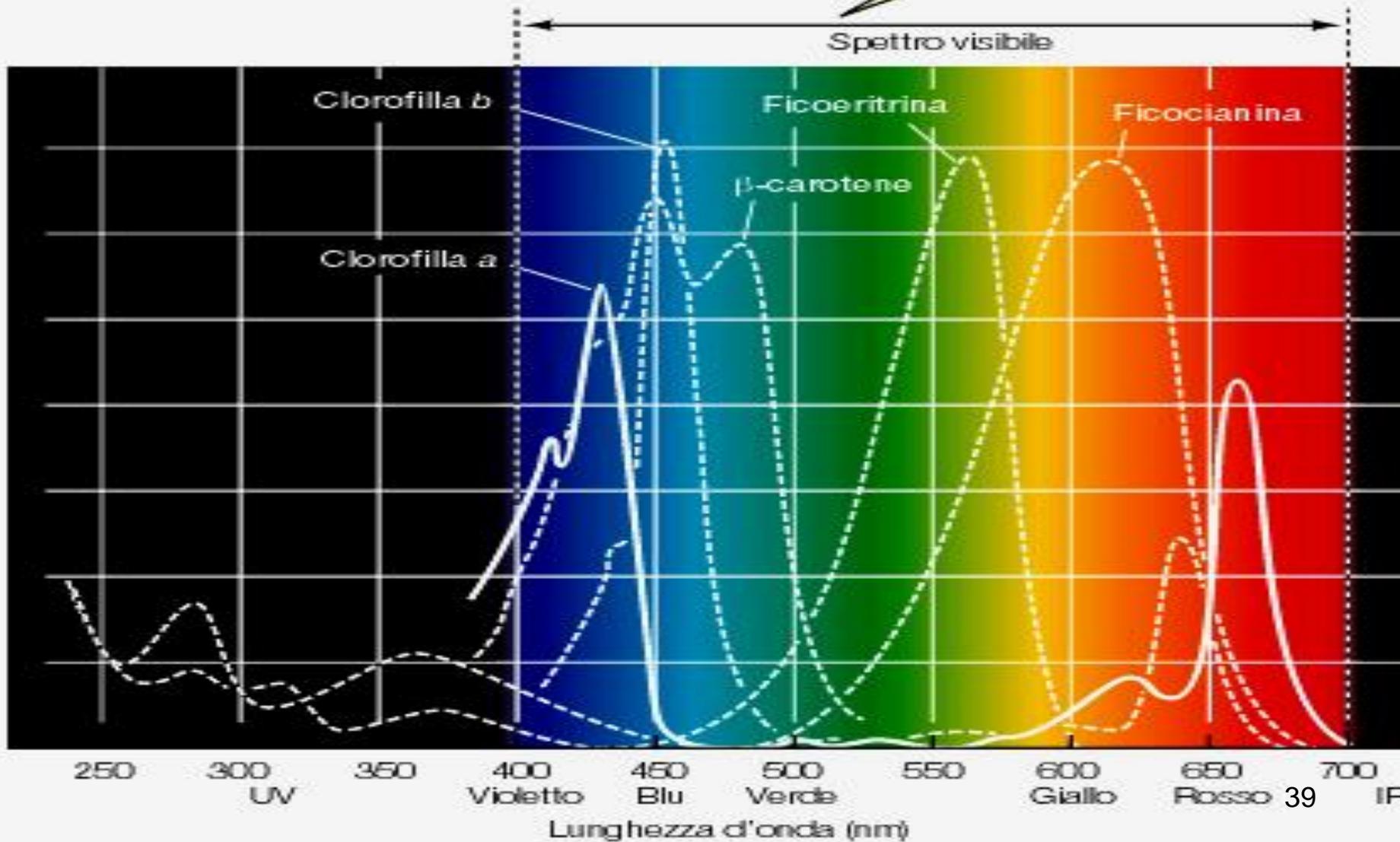


Spettri di assorbimento

Figura 10.9
 La curva in alto mostra lo spettro d'azione della fotosintesi e le curve in basso gli spettri d'assorbimento della clorofilla a, della clorofilla b e dei carotenoidi presenti nel cloroplasto. Notate che lo spettro d'azione della fotosintesi indica che la clorofilla a, la clorofilla b e i carotenoidi assorbono tutti la luce utilizzata nella fotosintesi (secondo Govindjee).

Spettro di assorbimento

Si noti quanta parte dello spettro visibile resterebbe inutilizzata se l'unico pigmento fotosintetico che assorbe la luce fosse la clorofilla *a*.



I principali pigmenti fotosintetici sono le clorofille, i carotenoidi e le ficobiline

Questi pigmenti differiscono tra loro per la struttura molecolare e per la capacità di assorbire luce di diverse lunghezze d'onda.

**Clorofille: a, b: piante; c, d: protisti e cianobatteri.
Batterioclorofille**

Table 7.1
Distribution of chlorophylls and other photosynthetic pigments

| Organism | Chlorophylls | | | | Bacteriochlorophylls | | | | | | Carotenoids | Phycobiliproteins | |
|----------------------------|--------------|---|---|---|----------------------|--------|---|--------|--------|---|-------------|-------------------|---|
| | a | b | c | d | a | b | c | d | e | g | | | |
| Eukaryotes | | | | | | | | | | | | | |
| Mosses, ferns, seed plants | + | + | - | - | | | | | | | | + | - |
| Green algae | + | + | - | - | | | | | | | | + | - |
| Euglenoids | + | + | - | - | | | | | | | | + | - |
| Diatoms | + | - | + | - | | | | | | | | + | - |
| Dinoflagellates | + | - | + | - | | | | | | | | + | - |
| Brown algae | + | - | + | - | | | | | | | | + | - |
| Red algae | + | - | - | + | | | | | | | | + | + |
| Prokaryotes | | | | | | | | | | | | | |
| Cyanobacteria | + | - | - | + | | | | | | | | + | + |
| Prochlorophytes | + | + | - | - | | | | | | | | + | - |
| Sulfur purple bacteria | | | | | | + or + | - | - | - | - | | + | - |
| Nonsulfur purple bacteria | | | | | | + or + | - | - | - | - | | + | - |
| Green bacteria | | | | | | + | - | + or + | + or + | - | | + | - |
| Heliobacteria | | | | | | - | - | - | - | + | | + | - |

Differiscono per i sostituenti sugli anelli e per la posizione dei doppi legami

Le piante, le alghe contengono anche la clorofilla b, che ha uno spettro d'assorbimento un po' diverso dalla clorofilla a.

La clorofilla b è un pigmento accessorio.

La clorofilla c sostituisce la b in alcuni gruppi di alghe, ad es. nelle alghe brune e nelle diatomee.

Batteri fotosintetici come batteri porpurei e i solfobatteri verdi, contengono la batterioclorofilla o clorobium-clorofilla.

CLOROFILLE

- Appartengono alla famiglia delle metalloporfirine.
- Possiedono un anello tetrapirrolico ciclico (Clorina) con un atomo di Mg coordinato al centro.

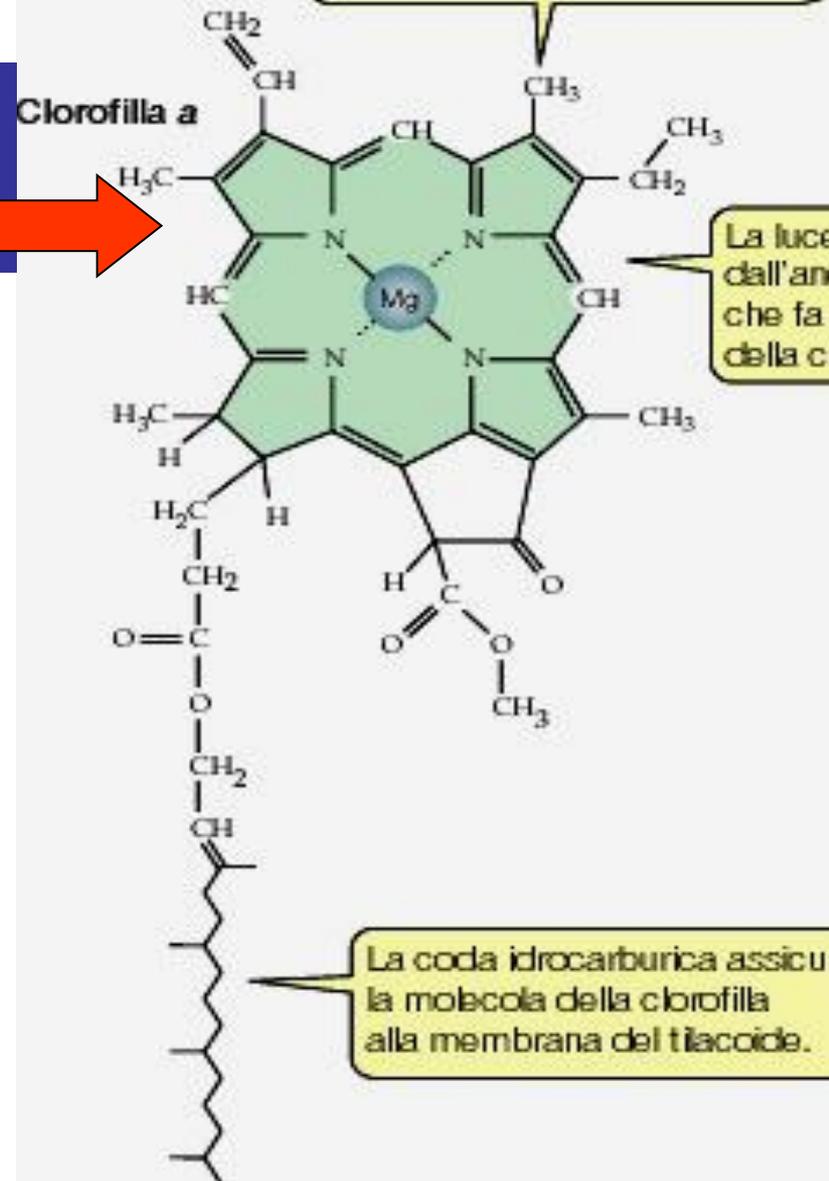
Clorofilla a

L'anello porfirinico è responsabile dell'assorbimento della luce

La clorofilla a contiene un atomo di magnesio, al centro dell'anello porfirinico, che forma legami con l'azoto.

La clorofilla a si trova in tutti gli eucarioti fotosintetizzanti e nei cianobatteri

Clorofilla a



Nella clorofilla b questo gruppo metilico è sostituito da un gruppo aldeidico, — CHO.

La luce viene assorbita dall'anello della clorina che fa parte della struttura della clorofilla.

La coda idrocarburica assicura la molecola della clorofilla alla membrana del tilacoide.

Altri pigmenti accessori: carotenoidi e ficobiline.

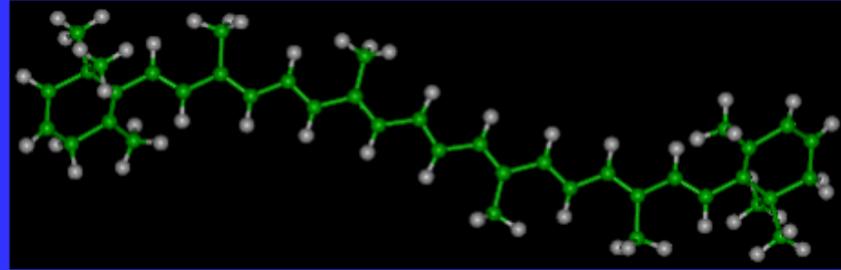
I carotenoidi svolgono anche un'azione antiossidante e proteggono le clorofille dai danni fotoossidativi. Senza i carotenoidi, la fotosintesi in presenza di ossigeno e luce sarebbe compromessa.

Anche i carotenoidi sono immersi nelle membrane tilacoidali.

Nei cloroplasti sono presenti due tipi di carotenoidi: caroteni e xantofille.

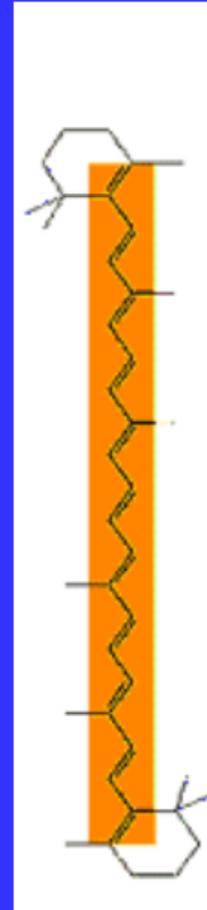
Le ficobiline sono presenti nei cianobatteri e nelle alghe rosse.

I CAROTENOIDI



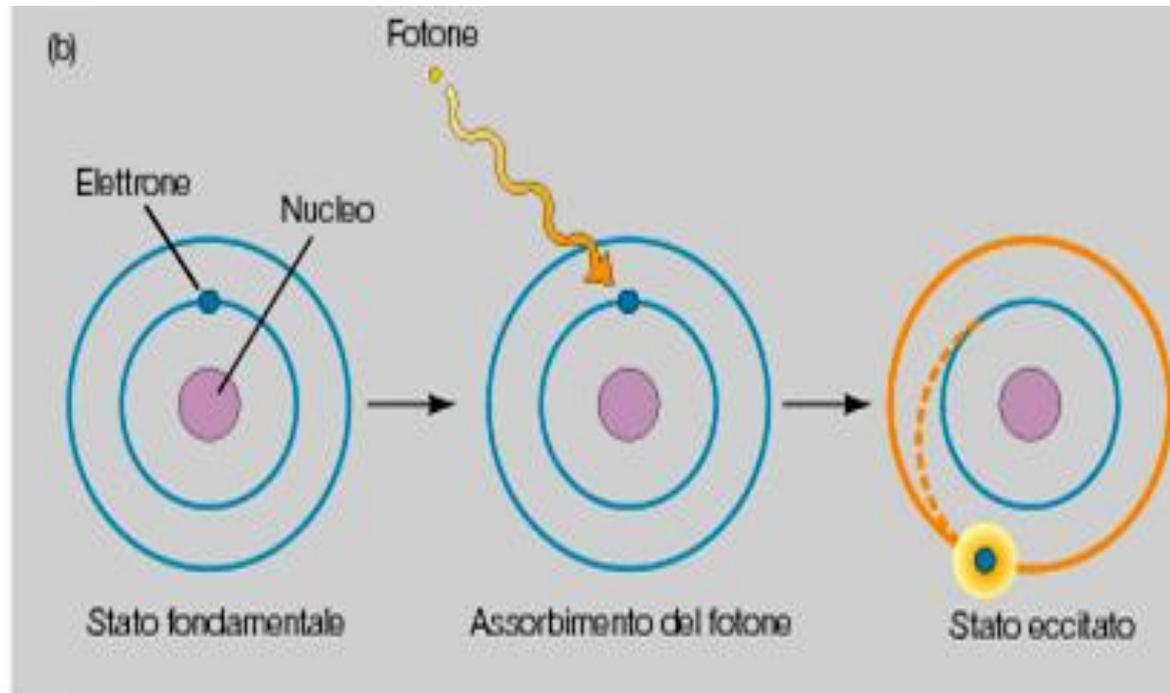
La molecola del β -carotene è caratterizzata da undici doppi legami coniugati.

I carotenoidi sono in grado di assorbire una banda nella zona del viola-blu-azzurro, frequenze non assorbite dalla clorofilla. Il loro ancoraggio, nella membrana dei tilacoidi, è simile a quello del fitolo.



**L'energia assorbita dai pigmenti accessori
deve essere trasferita alla clorofilla a.**

Eccitazione di una molecola



Quando un pigmento, allo stato fondamentale, viene colpito da un fotone prende l'energia e passa in uno stato eccitato caratterizzato da un maggiore contenuto energetico.

L'assorbimento del fotone spinge un elettrone dell'atomo in un orbitale più lontano dal nucleo.

L'e⁻ nell'orbitale con livello energetico più alto è chiamato **stato eccitato di singoletto**.

Quando le molecole di clorofilla (o di altri pigmenti) assorbono luce, gli elettroni vengono, temporaneamente, spinti ad un livello energetico superiore detto **stato eccitato**.

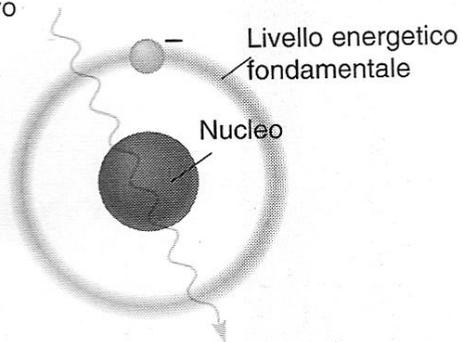
Quando gli elettroni ritornano allo stato fondamentale, rilasciano energia in tre modi diversi:

1-l'energia viene convertita in calore o in una forma di luce con lunghezza d'onda maggiore (fluorescenza);

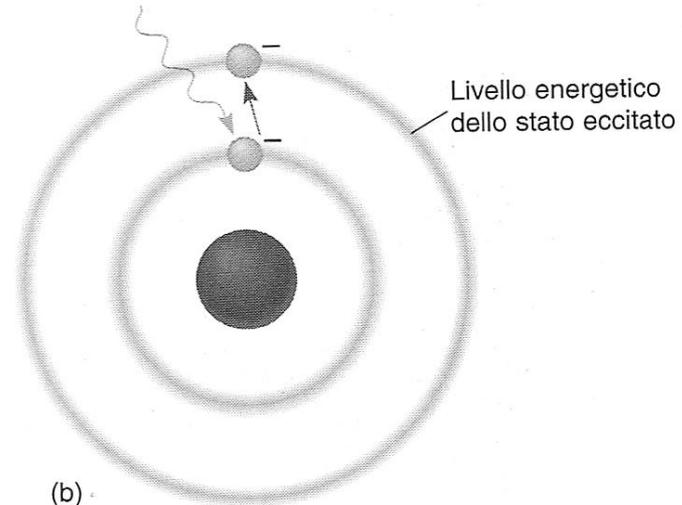
2-l'energia può essere trasferita da una molecola ad una adiacente eccitandola (**trasferimento di energia per risonanza**), più di una molecola è interessata da questo processo;

3-l'elettrone ad alta energia può essere trasferito ad un **accettore di elettroni** lasciando un **buco elettronico** nel pigmento eccitato.

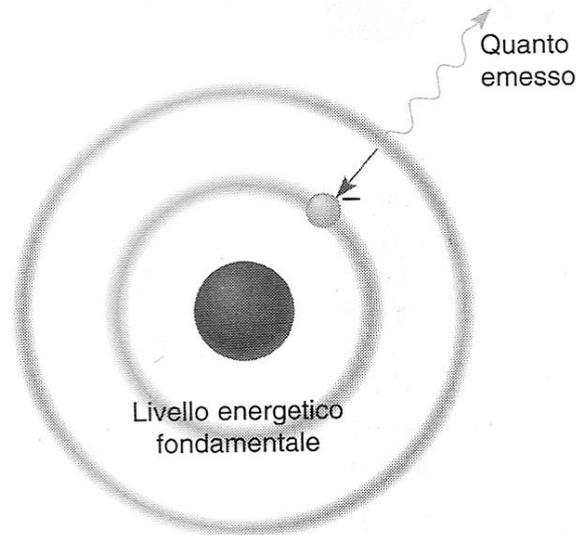
Quanto in arrivo



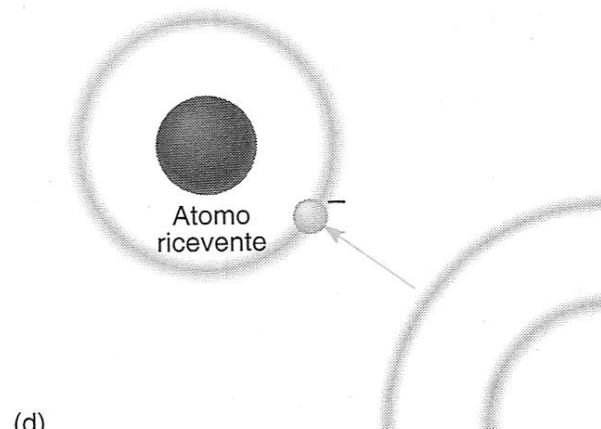
(a)



(b)



(c)



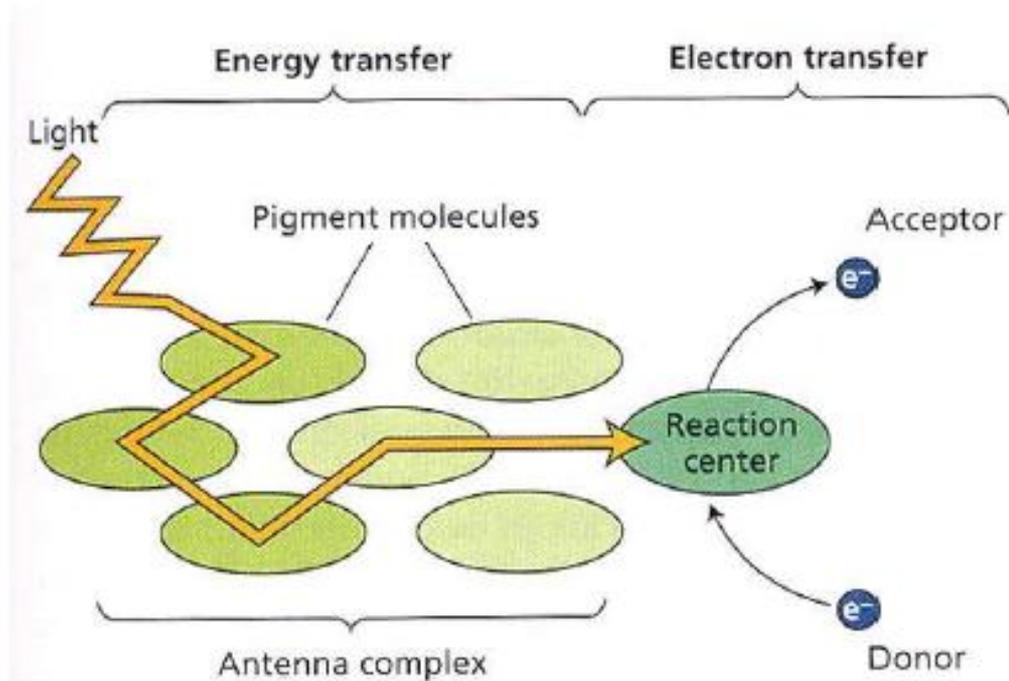
(d)

Nel processo fotosintetico:

1) l'energia luminosa viene trasferita da un atomo ad un altro atomo adiacente eccitandolo (**trasferimento di energia per risonanza**), più pigmenti sono coinvolti e subiscono questo processo;

2) l'elettrone ad alta energia può essere trasferito ad un **accettore di elettroni lasciando un buco elettronico** nel pigmento eccitato, **solo la clorofilla a subisce questo processo.**

la maggior parte dei pigmenti funzionano come un'antenna



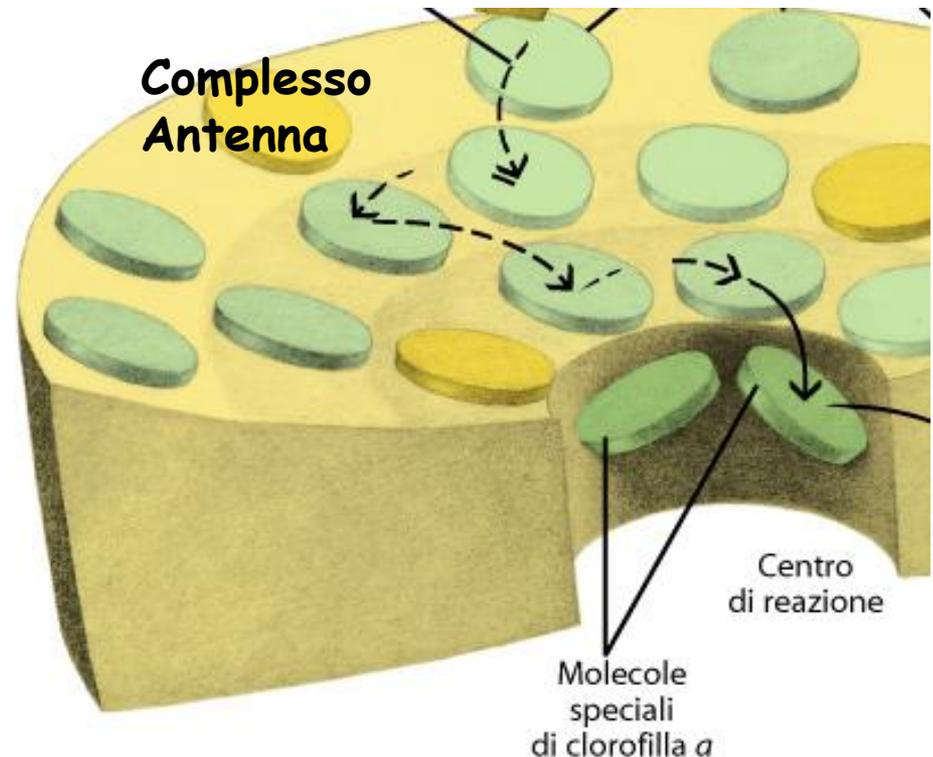
Convogliando l'energia luminosa ai centri di reazione del PSII e del PSI

Nel cloroplasto la clorofilla e gli altri pigmenti sono organizzati in unità dette **FOTOSISTEMI**.

I fotosistemi sono immersi nei tilacoidi

Sono presenti due fotosistemi detti **fotosistema I (PSI)** e **Fotosistema II (PSII)**.

Ogni fotosistema, formato da 250-400 molecole di pigmenti, è organizzato in due componenti strettamente associati: **un complesso antenna e un centro di reazione.**

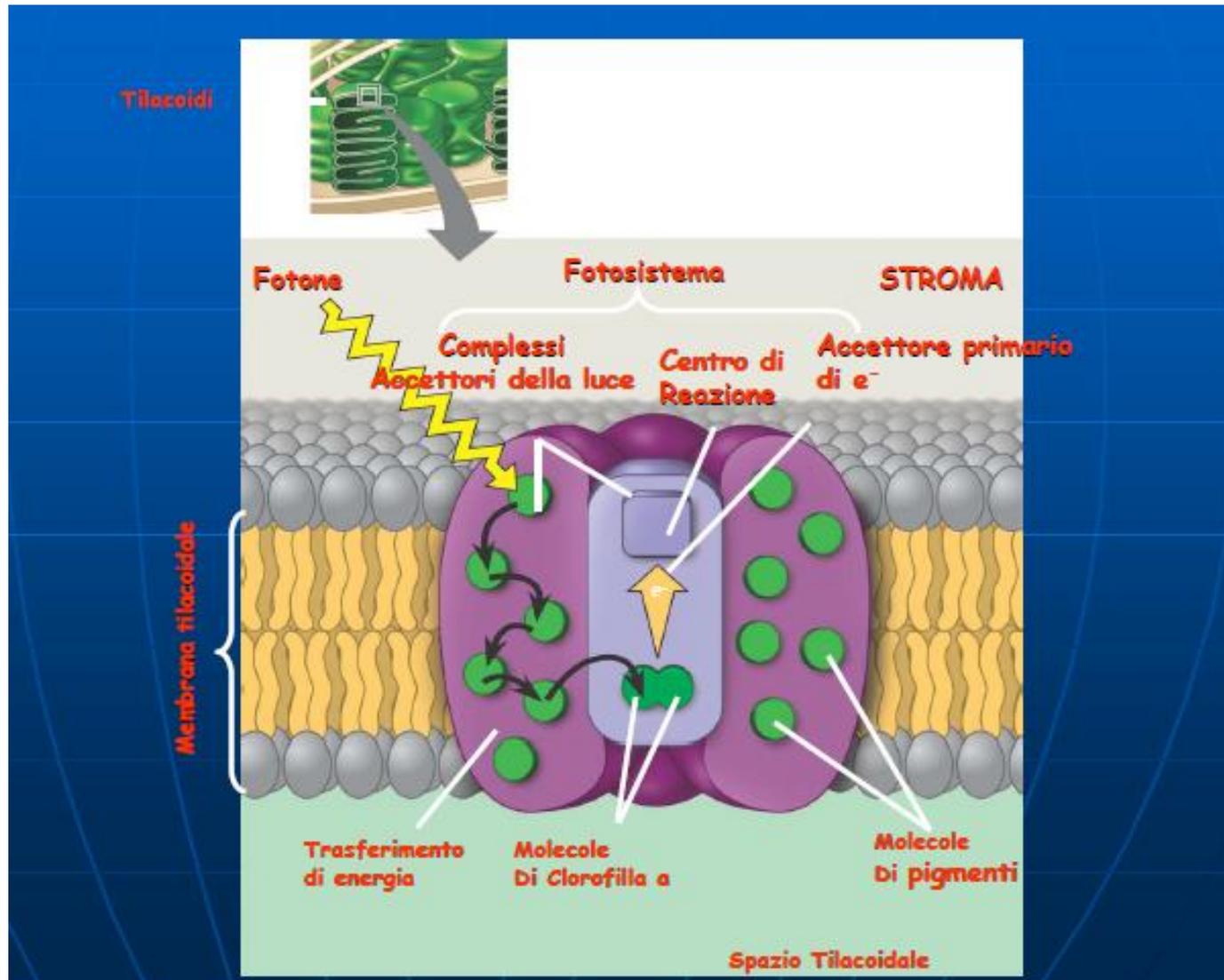


I complessi antenna sono costituiti da pigmenti accessori e proteine. Questi complessi captano l'energia luminosa e la convogliano al centro di reazione.

Il centro di reazione è formato da un'insieme di proteine e **clorofilla a** (due molecole).

È qui che avviene la conversione dell'energia luminosa in energia chimica.

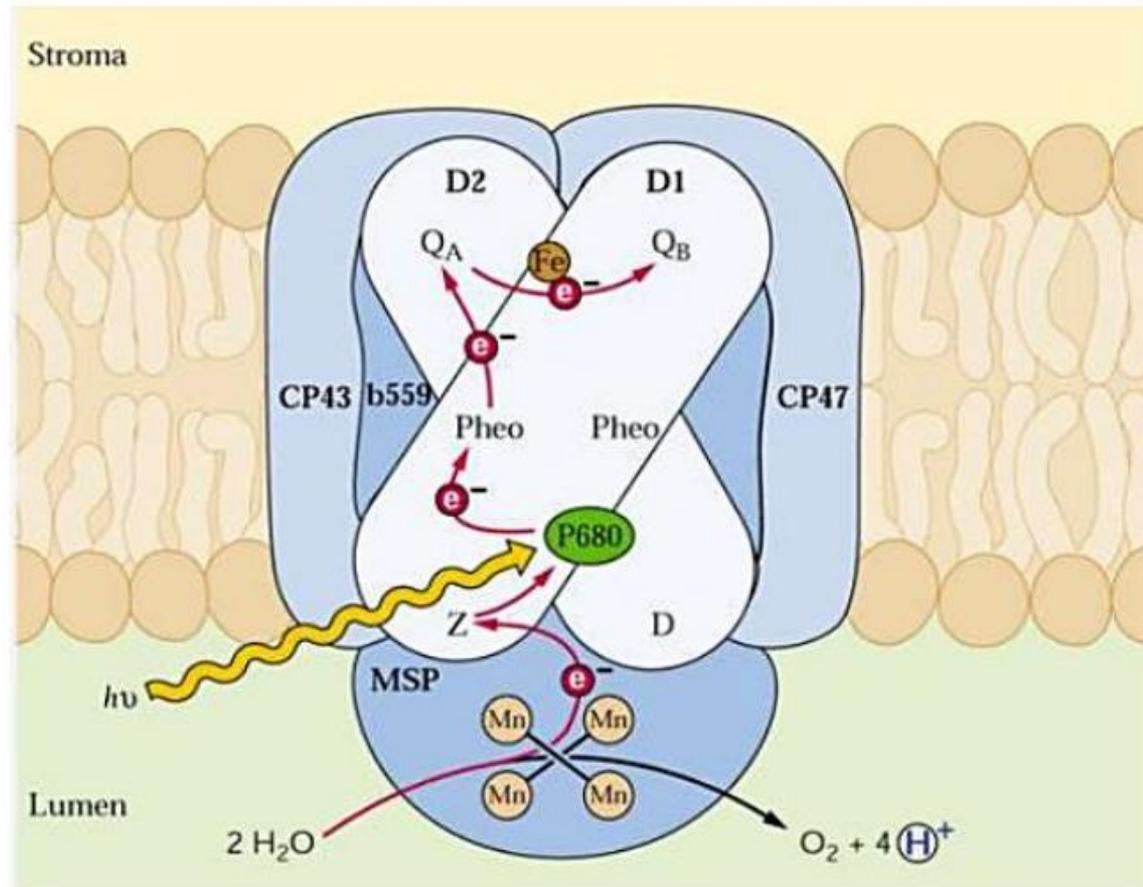
Un fotosistema è composto da numerosi accettori di fotoni (complessi antenna) e da un centro di reazione.



Nel PSI le molecole di clorofilla a del centro di reazione sono note come P700. "P" sta per pigmento e 700 è la lunghezza d'onda espressa in nm, relativa al massimo assorbimento.

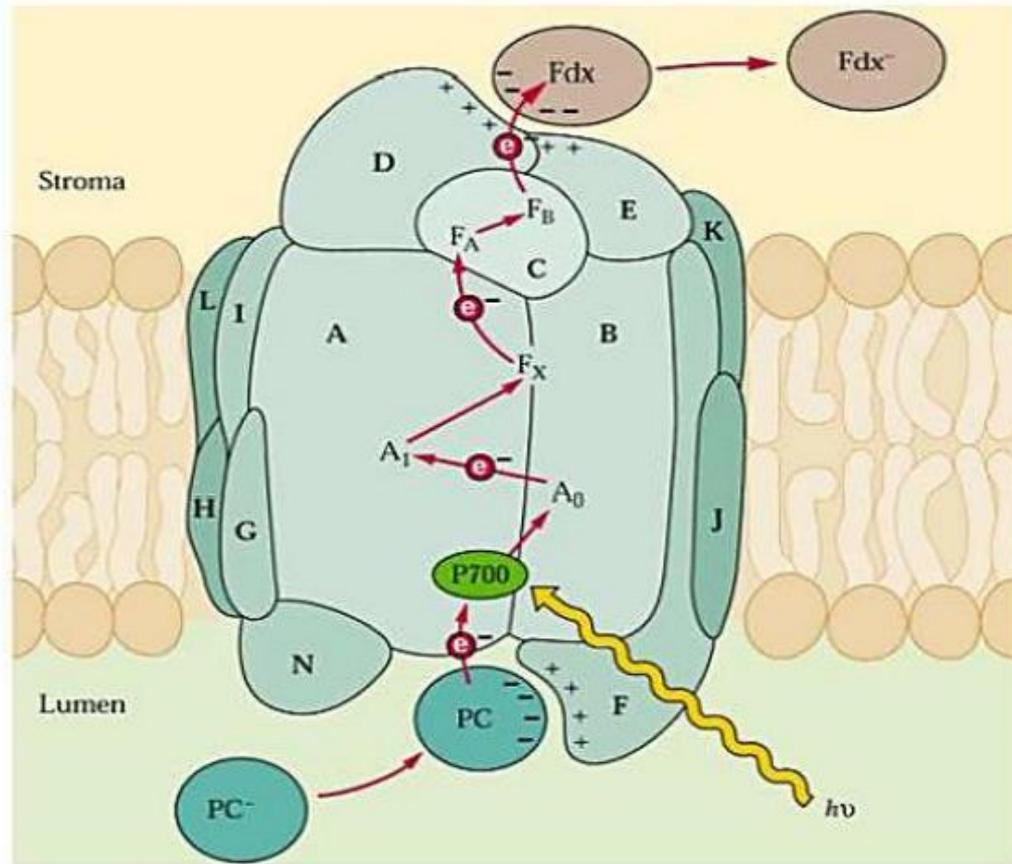
Nel PSII, noto come P680, l'energia luminosa massima che può assorbire il centro di reazione ha lunghezza d'onda pari a 680 nm.

PSII



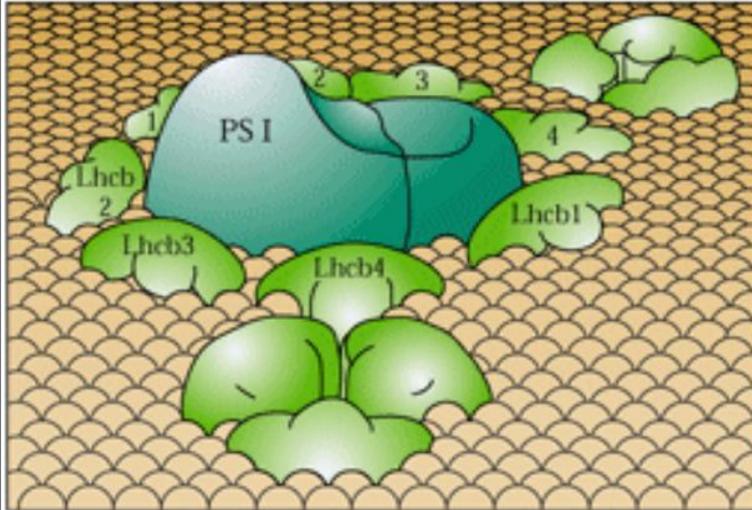
Il **PS II** (centro di reazione, complesso antenna, proteine di trasporto elettronico) e' localizzato prevalentemente nelle zone appressate delle lamelle dei grana

PSI

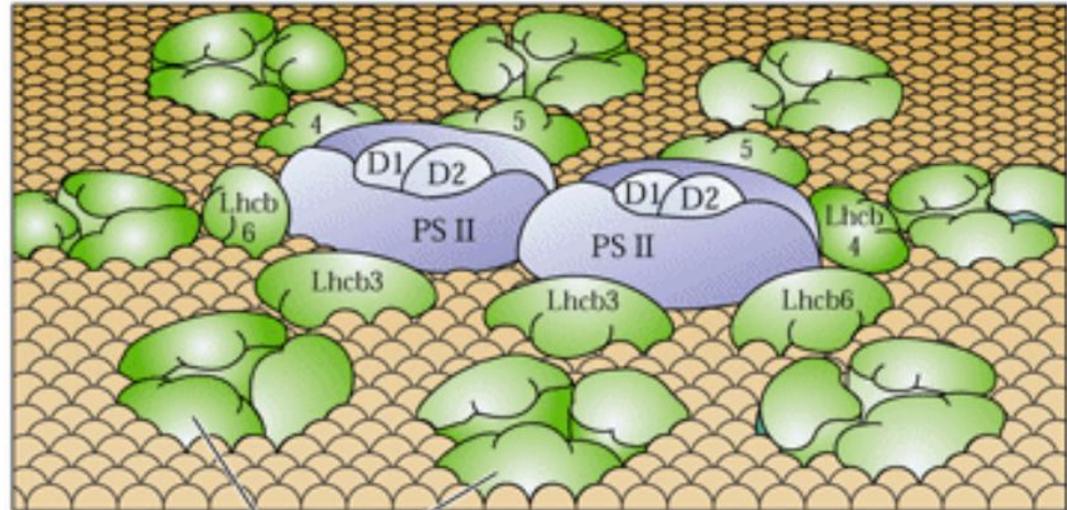


Il **PS I** (centro di reazione, complesso antenna, proteine di trasporto elettronico) e l'ATP Sintasi sono localizzati quasi esclusivamente nelle lamelle stromatiche e sui bordi delle lamelle dei grana

Fotosistema I



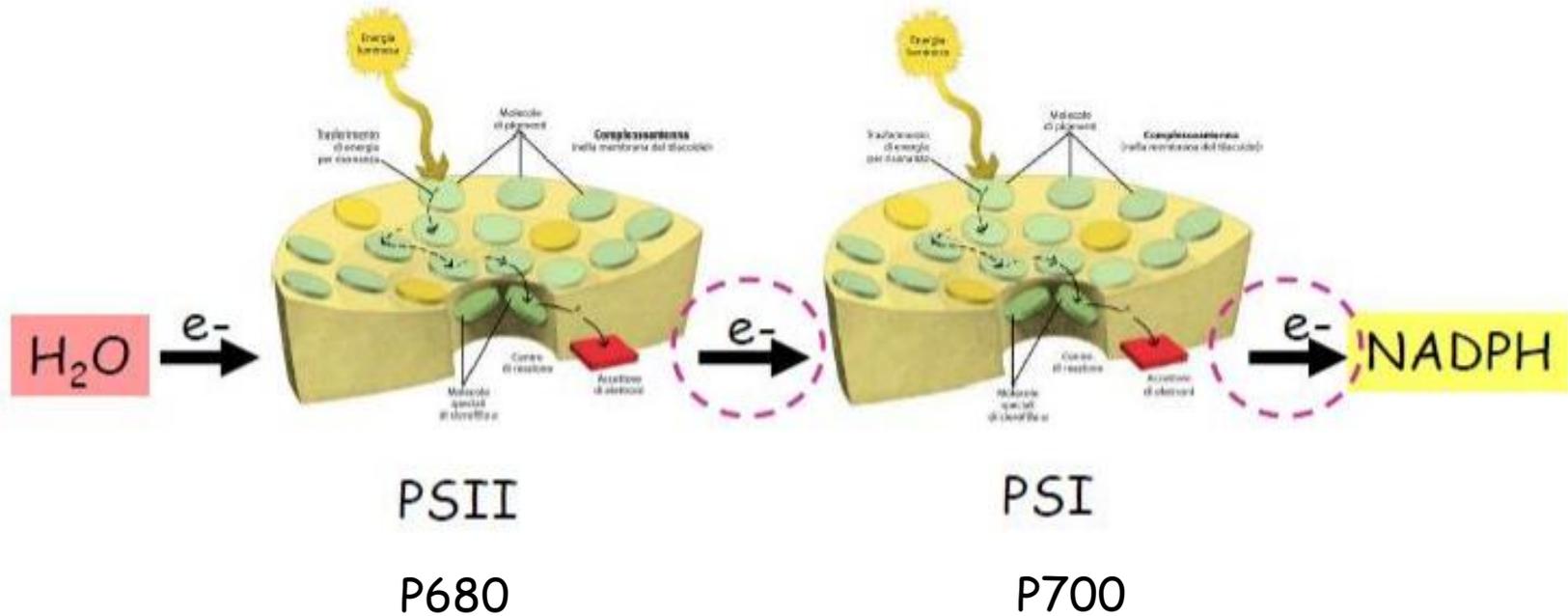
Fotosistema II



Trimerico di LHCI^{b2}

Ai pigmenti che costituiscono i PSI e II sono associate alcune proteine. Le proteine associate alle clorofille a e b ed ai carotenoidi del fotosistema I sono definite complesso LHCI (Light Harvesting Complex I), quelle associate al PSII LHCII.

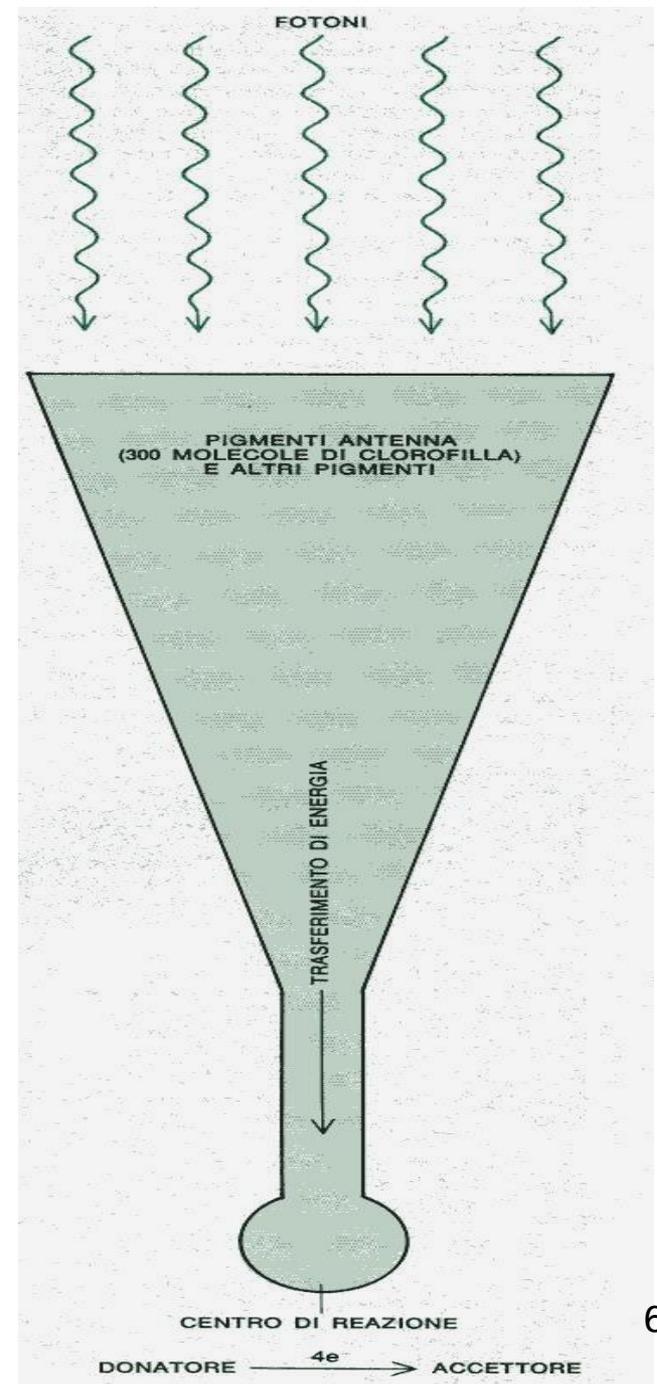
I due fotosistemi lavorano in serie



Trasferimento di energia (antenne)

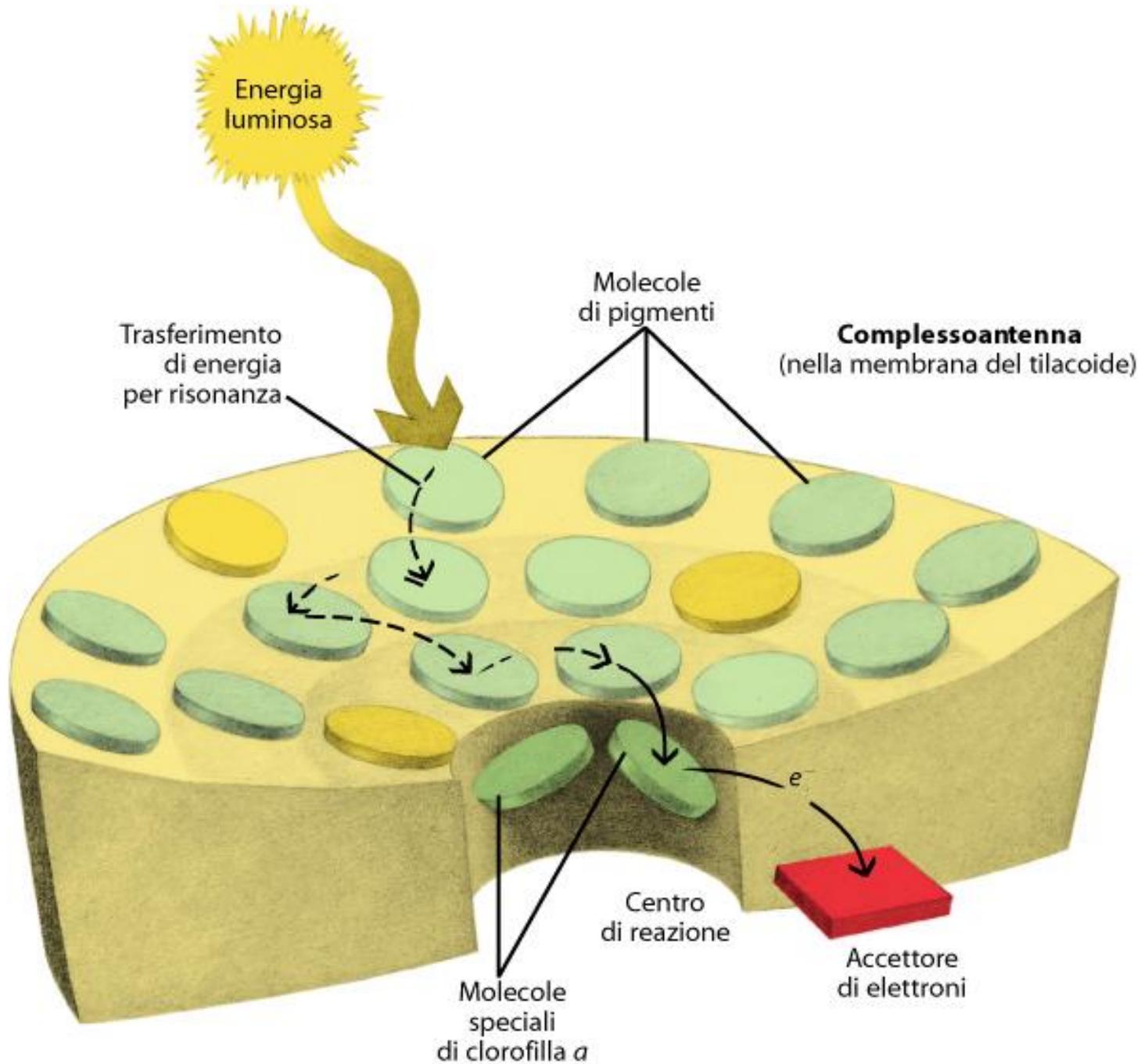
Chi è che assicura il trasferimento di energia?

Il trasferimento di energia verso il centro di reazione è assicurato dal minore stato energetico necessario ad eccitare i pigmenti via via più vicini al centro di reazione .



Quindi:

- I complessi "accettori di luce"
 - Consistono di pigmenti legati a specifiche proteine
 - Canalizzano l'energia del fotone di luce al centro di reazione
- Quando la molecola di clorofilla del centro di reazione assorbe energia
 - Uno degli elettroni è mandato all'accettore primario di elettroni



LA CONVERSIONE QUANTICA

- **La conversione di energia, da energia dei fotoni a energia chimica degli elettroni, che avviene a carico della clorofilla *a* è detta conversione quantica.**

Ricapitolando:

Tutti i pigmenti di un PS sono in grado di assorbire fotoni, ma solo una coppia di molecole di clorofilla a per PS può utilizzare l'energia.

Quando una delle due molecole di clorofilla a assorbe energia luminosa uno dei suoi e^- viene spinto a un livello energetico superiore e trasferito ad un accettore di e^- . Inizia così il flusso elettronico della fotosintesi.

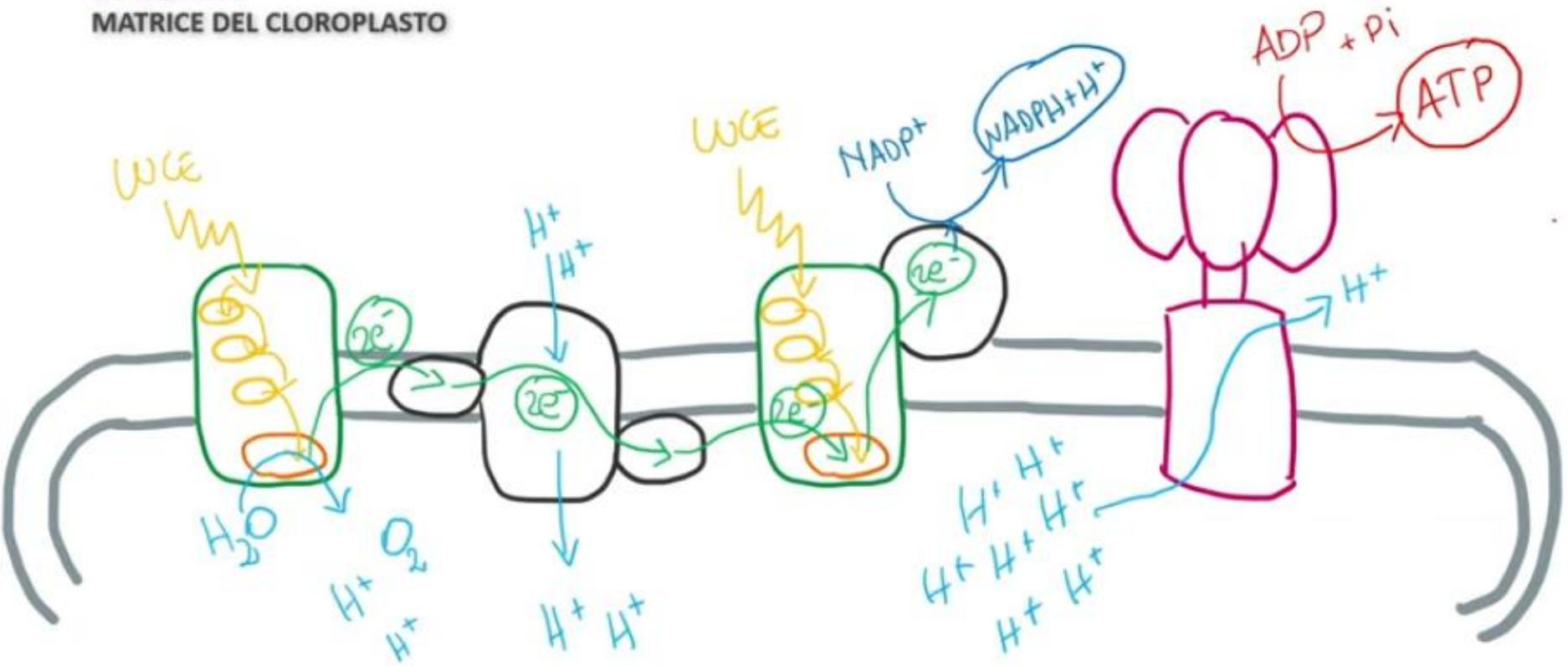
La molecola di clorofilla a che ha perso l' e^- è ossidata e carica positivamente.

Il PSI e il PSII sono legati insieme da una catena di trasporto degli elettroni.

In generale il PSI e PSII funzionano simultaneamente e in modo coordinato. Tuttavia, il PSI può anche funzionare in modo indipendente. ⁶⁵

STROMA

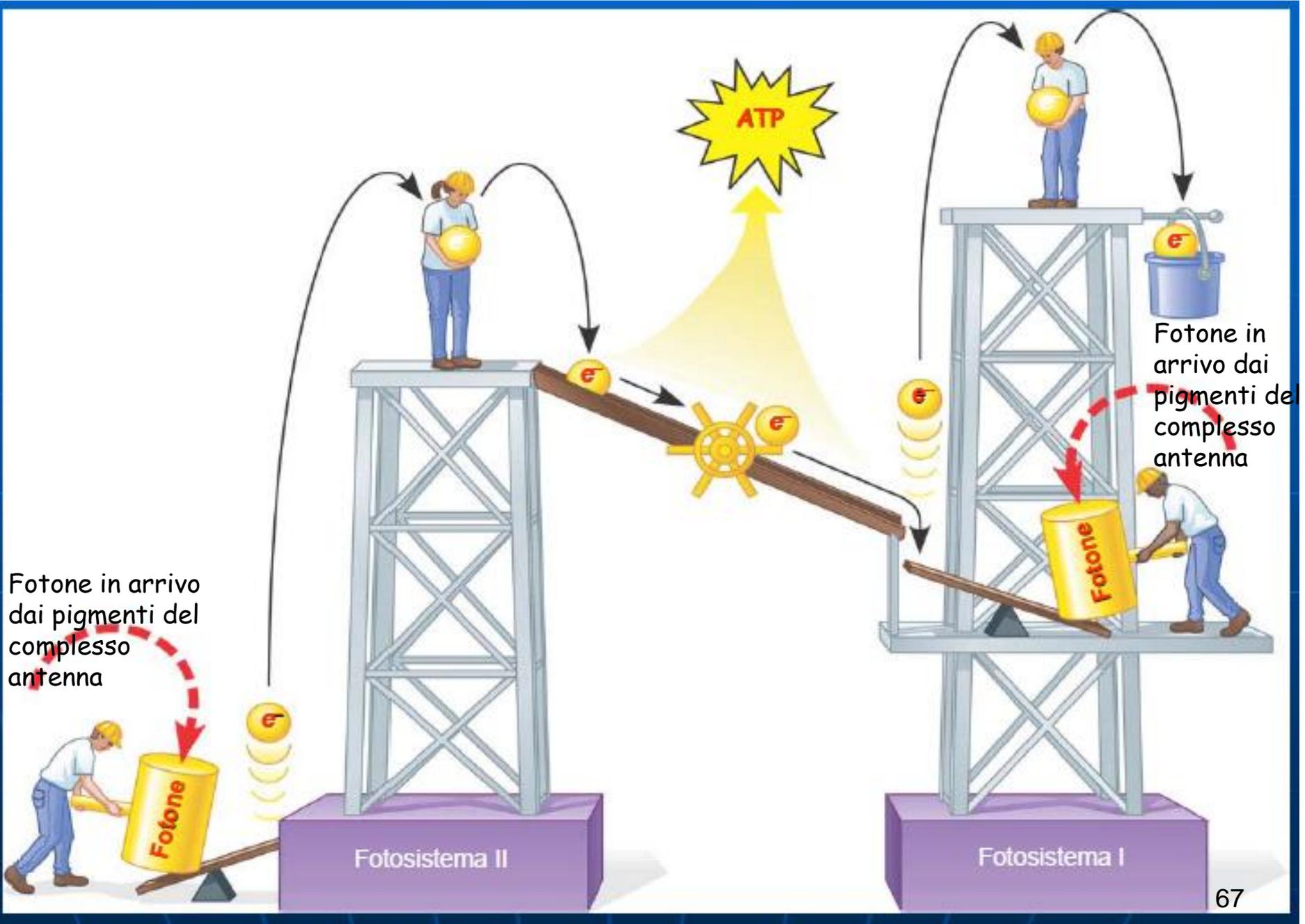
MATRICE DEL CLOROPLASTO



LUME

DEL TILACOIDE





Fotone in arrivo dai pigmenti del complesso antenna

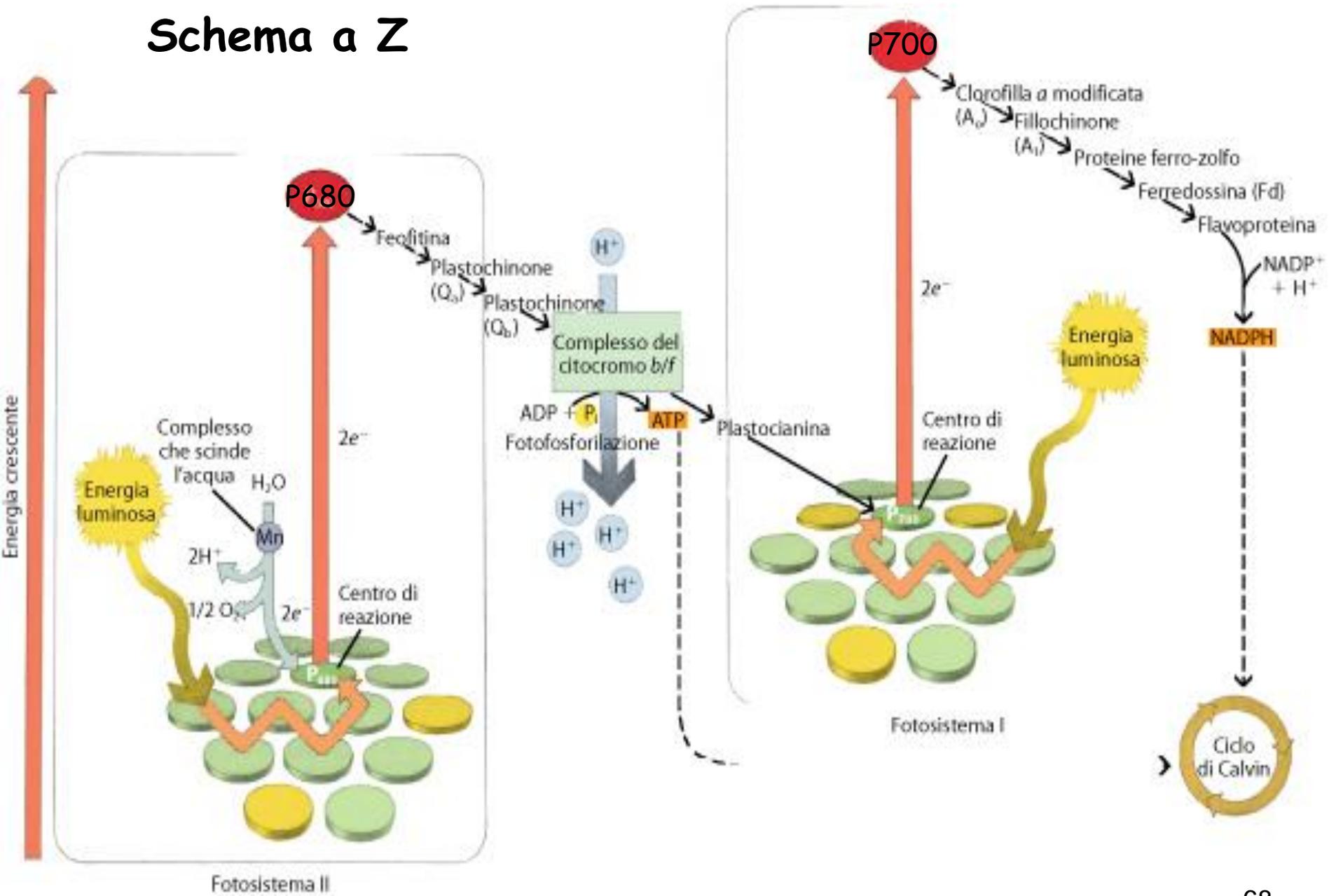
Fotone in arrivo dai pigmenti del complesso antenna

Fotosistema II

Fotosistema I

ATP

Schema a Z

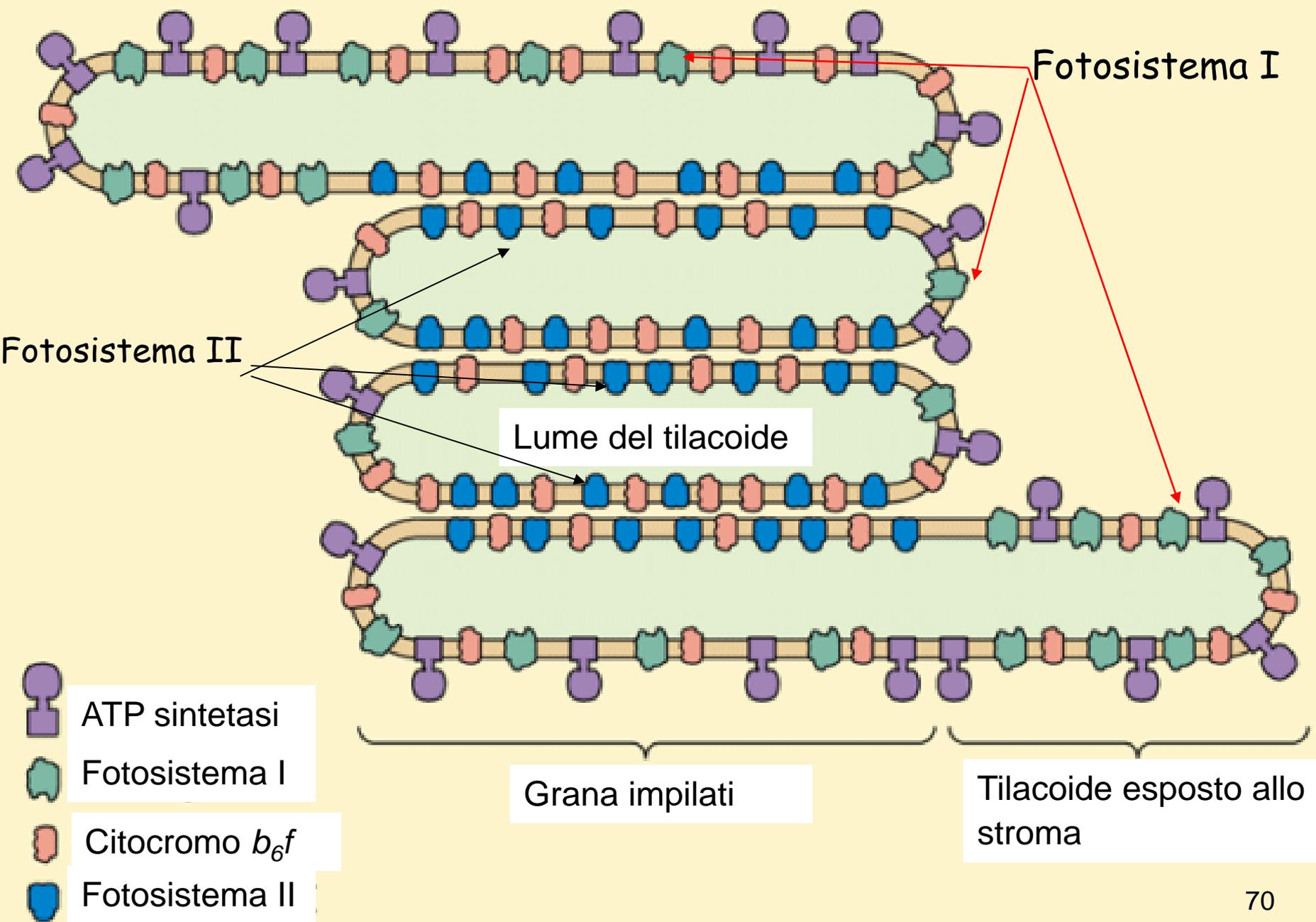


Dislocazione dei Fotosistemi

Come anticipato:

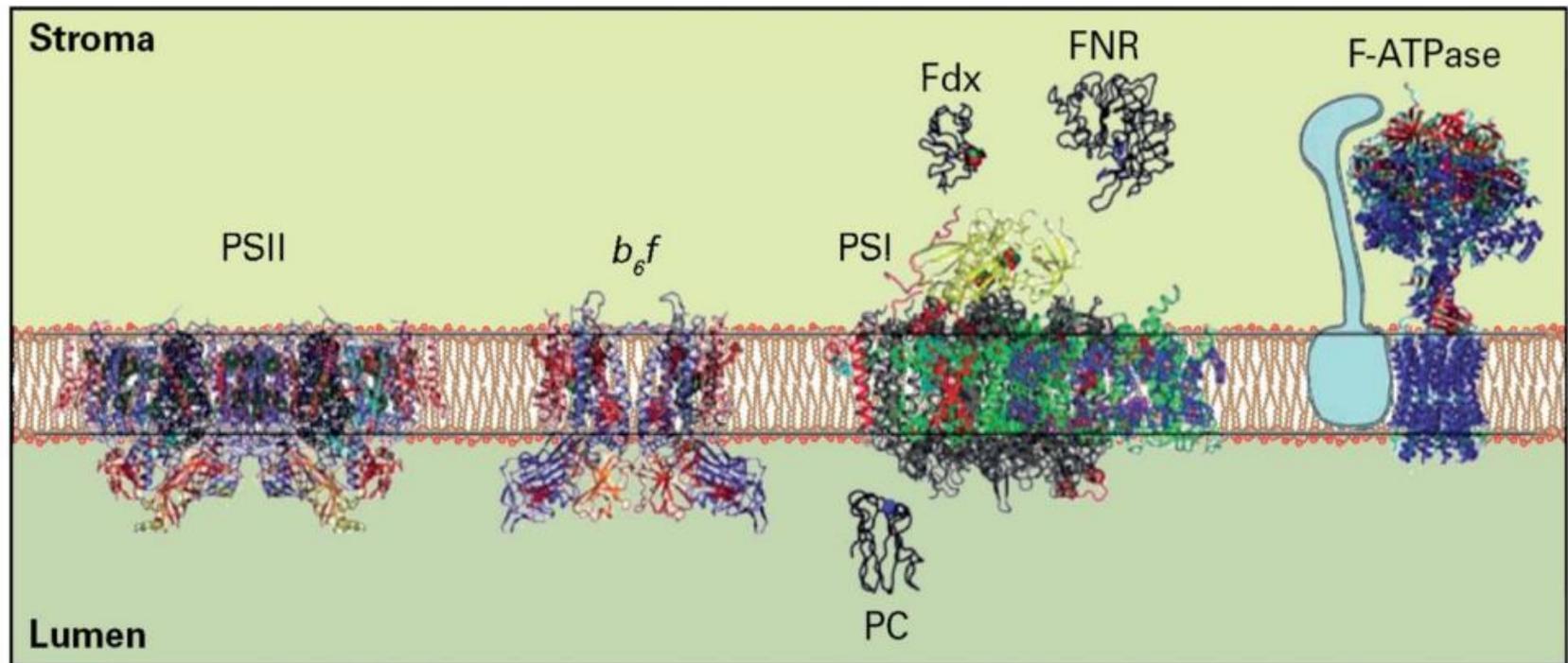
Il **PSII** (centro di reazione, complesso antenna, proteine di trasporto elettronico) è localizzato prevalentemente nelle zone appressate delle membrane dei grana.

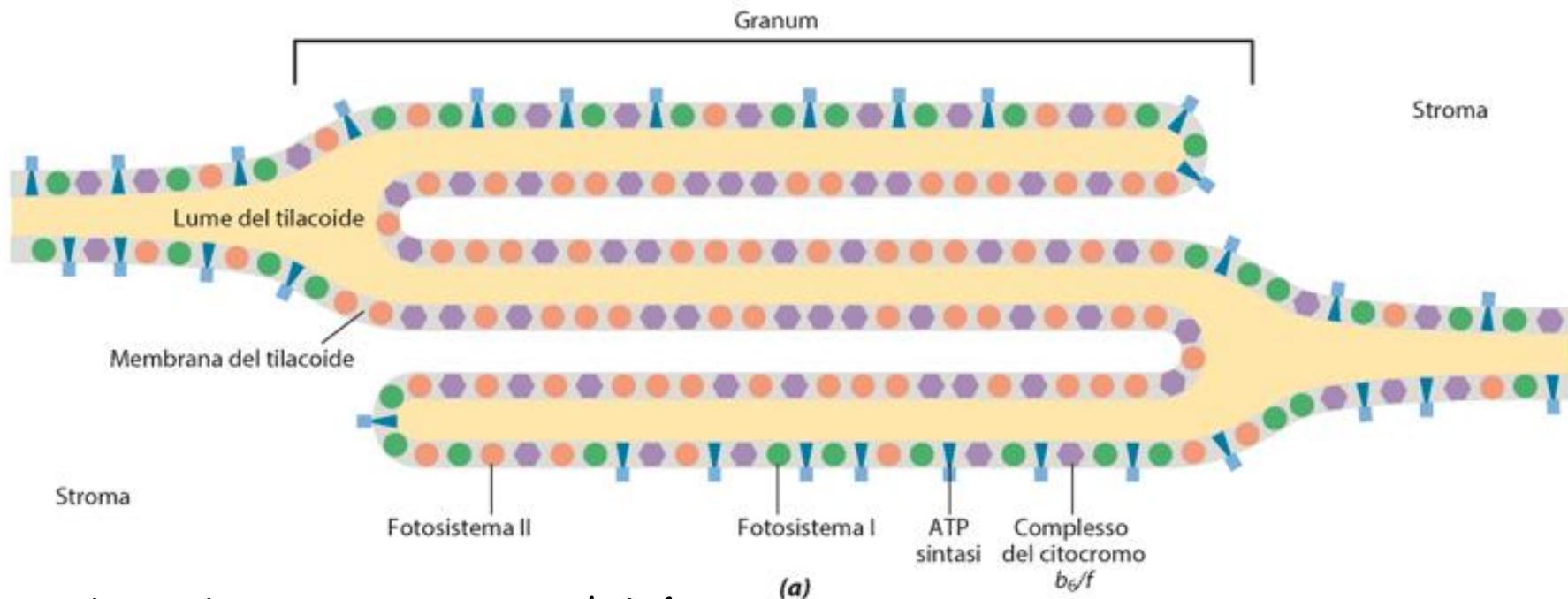
Il **PSI** (centro di reazione, complesso antenna, proteine di trasporto elettronico) e l'ATP Sintasi sono localizzati quasi esclusivamente sulle membrane stromatiche e sui bordi delle membrane dei grana.



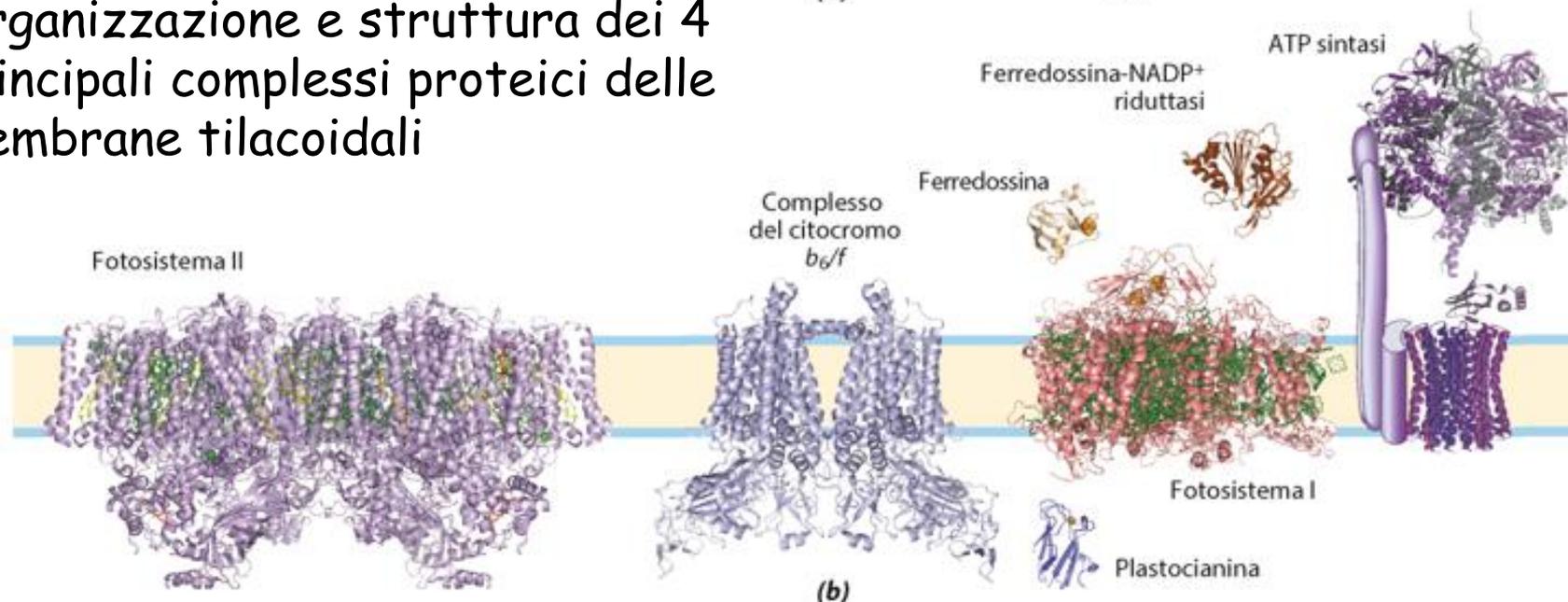
Quattro principali complessi proteici sono responsabili dei processi chimici delle reazioni alla luce

- Fotosistema II
- Complesso citocromo b_6-f \implies È responsabile del trasferimento degli elettroni dal fotosistema II al fotosistema I
- Fotosistema I
- ATP sintasi





Organizzazione e struttura dei 4 principali complessi proteici delle membrane tilacoidali



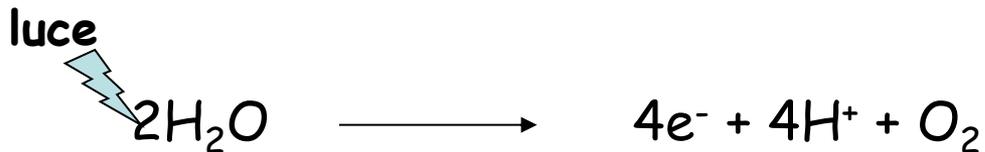
La molecola di P_{680} che ha perso l' e^- è in grado di rimpiazzarlo sottraendolo a molecole di H_2O . L'acqua è sempre presente sotto forma di H_2O , H^+ e OH^- .

Come vengono recuperati e^- dalla molecola di acqua?

Mediante una reazione detta FOTOLISI dell'acqua.

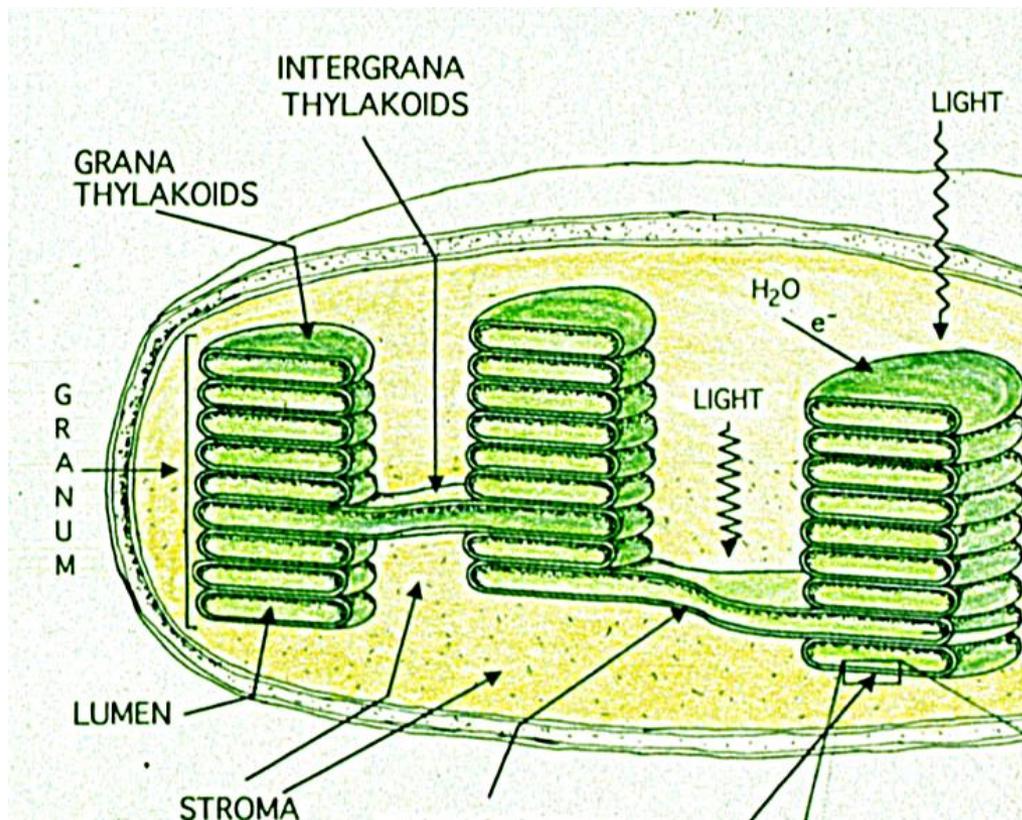
La fotolisi dell'acqua avviene sul lato che si affaccia nel lume dei tilacoidi.

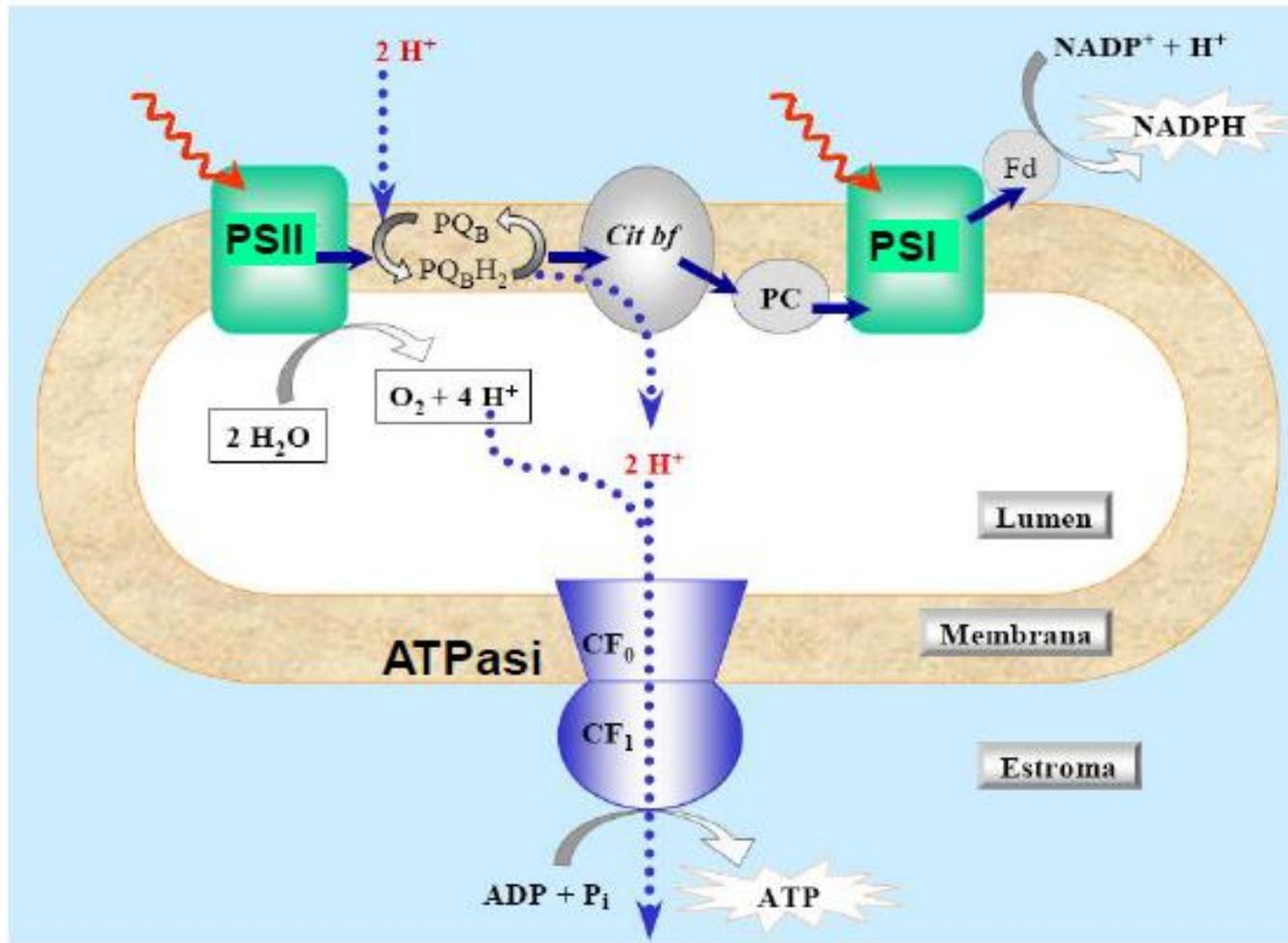
È una reazione di scissione ossidativa.



Questa reazione è catalizzata dall'enzima **fotoliasi dell'acqua** o **complesso di evoluzione dell'ossigeno (OEC)**.

La fotolisi dell'acqua è localizzato sul lato interno della membrana del tilacoide e i protoni vengono rilasciati nel lume del tilacoide determinando un gradiente protonico attraverso la membrana del tilacoide, questo gradiente permette la sintesi di ATP.





Il trasferimento degli elettroni genera un gradiente di protoni fra i lati della membrana (pH = 8 nello stroma e pH = 4,5 nel lume, l'energia viene utilizzata per la sintesi di ATP.

Quindi:

1) Il buco elettronico del PSII viene colmato da e^- provenienti dalla fotolisi dell'acqua.

2) Il vuoto di e^- del PSI viene rimpiazzato dagli e^- proveniente dalla catena di trasporto degli elettroni, e cioè dal PSII.

Ricapitolando: nelle reazioni della fase luminosa, gli elettroni fluiscono dall'acqua al PSII, al PSI, al NADP⁺.

La sintesi di ATP nella fase luminosa della fotosintesi

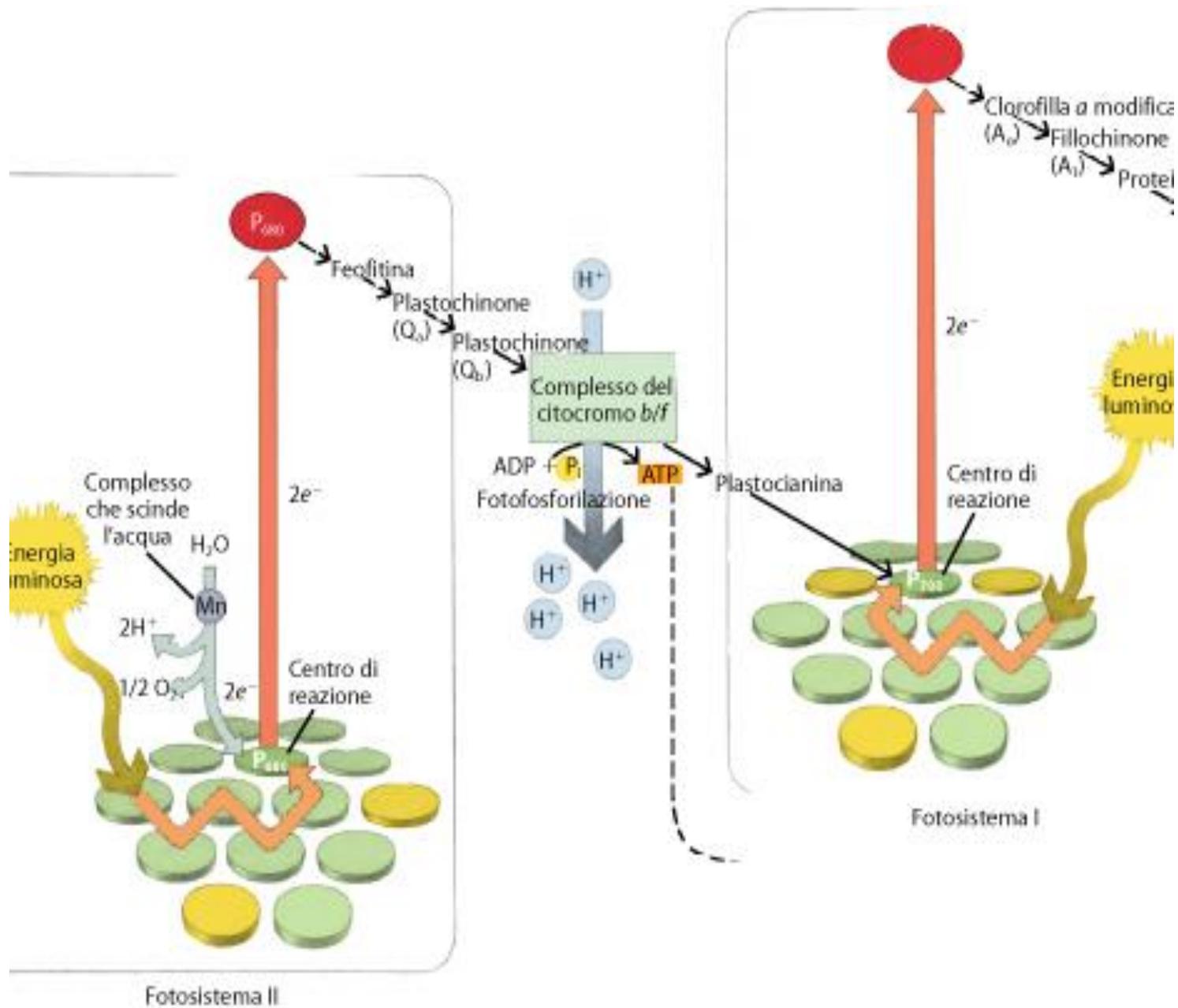
- Avviene accoppiando al flusso di elettroni la formazione di un gradiente di concentrazione di idrogenioni [cioè un differente pH (pH =8 nello stroma e pH = 4,5 nel lume)] fra il lumen dei tilacoidi e lo stroma e mediante l'attivazione del complesso dell'ATP sintetasi.

Processo Chemiosmotico in Cloroplasti e Mitochondri

- Cloroplasti e Mitochondri
 - Generano ATP con lo stesso meccanismo di base: la chemiosmosi
 - Utilizzano differenti fonti di energia per accoppiare il processo di sintesi dell'ATP

La catena di trasporto degli e^- tra i due fotosistemi è simile alla catena respiratoria. Sono coinvolti chinoni, citocromi, e proteine ferro-zolfo. Nel trasporto fotosintetico intervengono anche la plastocianina e la feofitina.

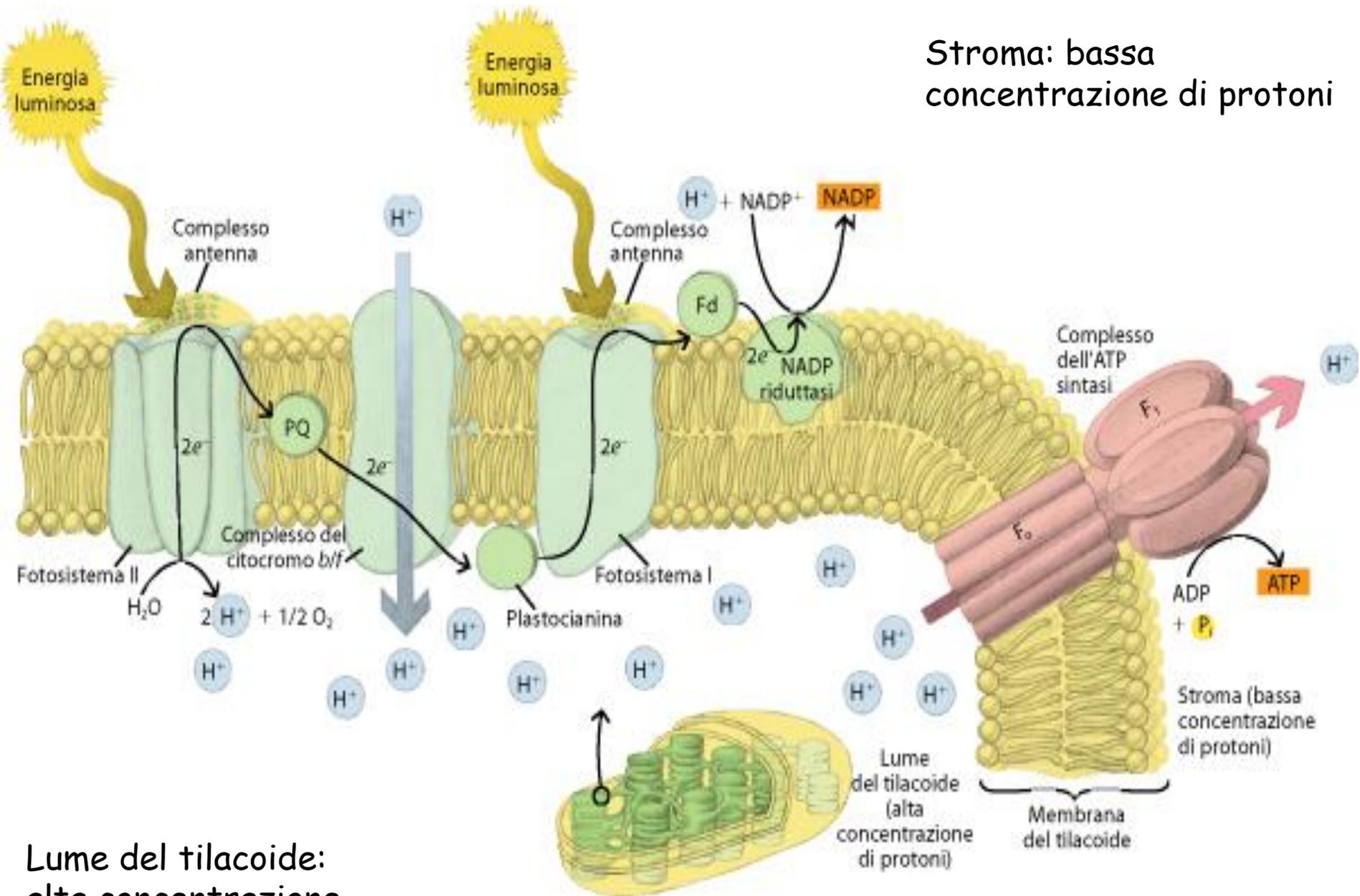
La catena di trasporto è organizzata in modo tale che il trasferimento degli e^- si associ al movimento dei protoni attraverso la membrana tilacoidale, generando un gradiente elettrochimico di protoni. Questo gradiente è necessario per la sintesi di ATP.



L'ATP sintetasi (nota anche come complesso CF_0 - CF_1) è immersa nella membrana del tilacoide e forma un canale attraverso cui i protoni possono fluire, secondo gradiente. L'energia potenziale del gradiente permette la sintesi di ATP da ADP e P_i .

CF_0 - CF_1 (CF: coupling factor). CF_0 è la porzione, idrofobica) legata alla membrana, CF_1 è la porzione che rivolta verso lo stroma.

Stroma: bassa
concentrazione di protoni



Lume del tilacoide:
alta concentrazione
di protoni

Il processo di sintesi di ATP associata alla fotosintesi è detto

FOTOFOSFORILAZIONE,

per sottolineare che l'energia necessaria per mantenere il gradiente protonico è data dalla luce.

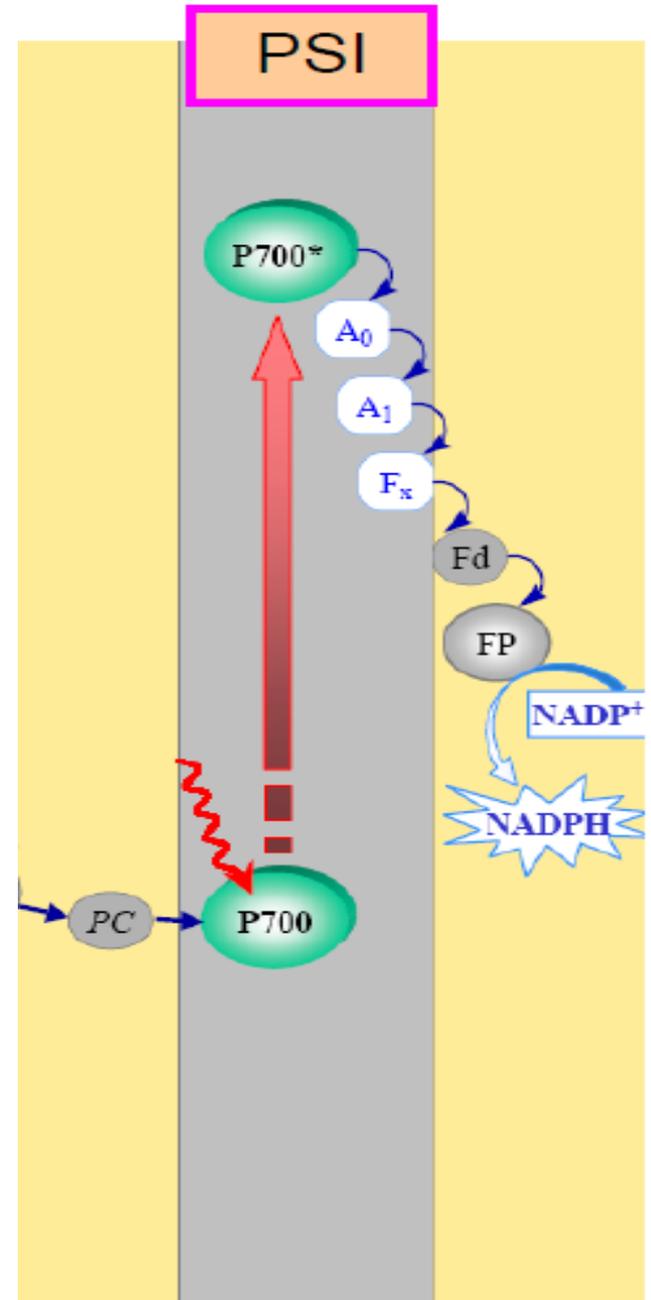
I processi di sintesi dell'ATP (fotosintesi e respirazione) avvengono con un meccanismo di base uguale: l'accoppiamento chemiosmotico.

Quindi, il processo di sintesi dell'ATP mediato dalla luce coinvolge, in tutti gli organismi fotoautotrofi, il trasporto di elettroni attraverso diversi trasportatori.

Questi trasportatori di elettroni sono organizzati, nelle membrane tilacoidali, in serie, da quello con potenziale più negativo a quello con potenziale più positivo.

La clorofilla a del centro di reazione del fotosistema I, eccitata dalla luce invia il suo elettrone ad un accettore primario di e- che a sua volta lo trasferisce ad altri accettori fino ad arrivare ad un ultimo accettore l'**NADP+** che si riduce in **NADPH**.

L'**NADPH** è un forte agente riducente, può spostarsi nelle membrane dei tilacoidi.



Il flusso di e^- dall'acqua all'NADPH è detto
flusso di e^- non ciclico

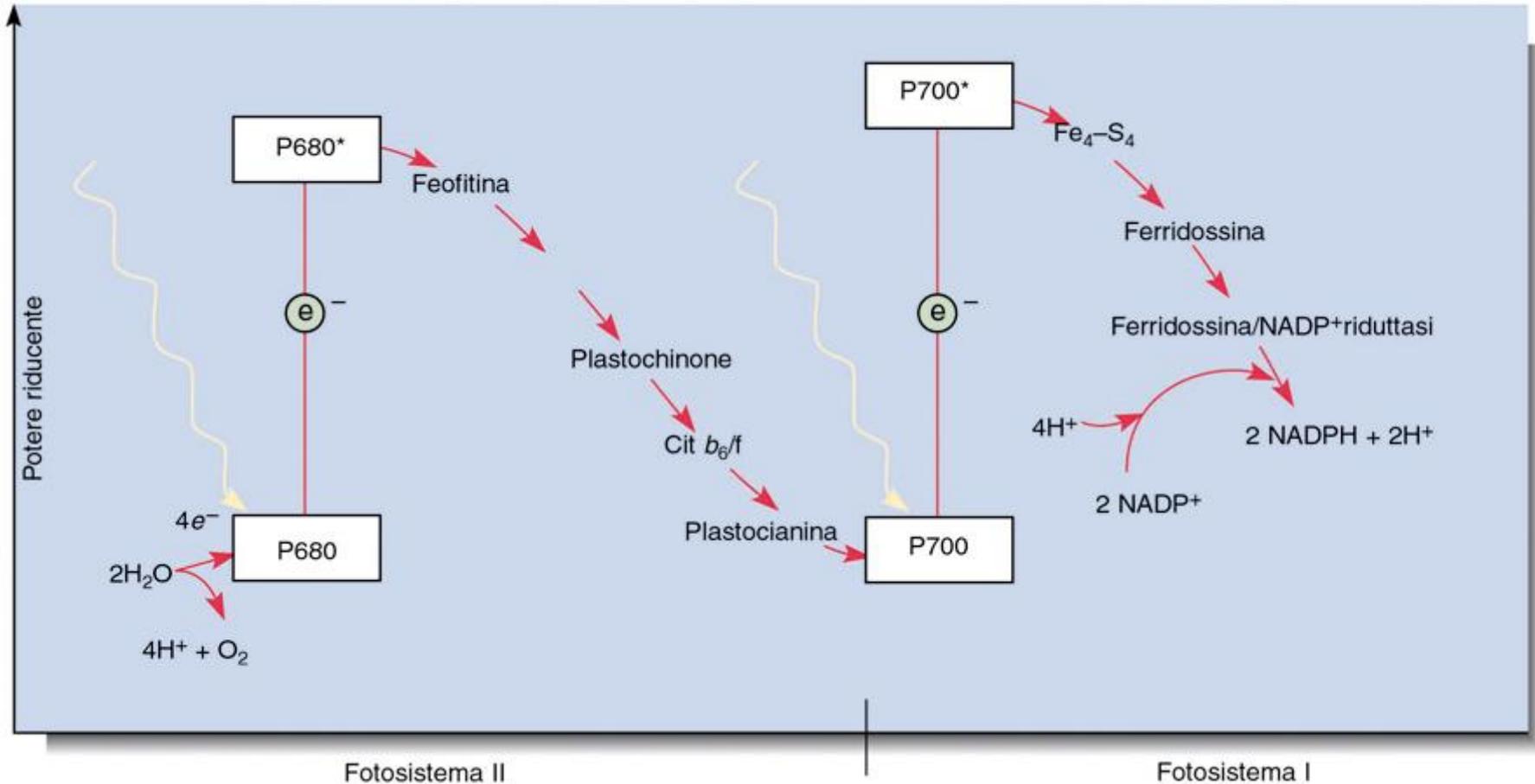
- Il flusso di elettroni NON CICLICO
 - È il processo principale di trasformazione dell'energia nella fase luminosa

Riassumendo:

In presenza di luce si realizza un flusso continuo di e⁻ dall'acqua, attraverso il PSII e il PSI fino all' NADPH.

Questo flusso unidirezionale è detto flusso di elettroni non ciclico e la produzione di ATP ad esso associato è detta **fotofosforilazione non ciclica.**

Visione d'insieme del flusso non ciclico degli elettroni nello schema a Z



L'energia totale ricavata dal flusso non ciclico di e^- (riferita al passaggio di 6 coppie di e^- da H_2O a NADPH) è di 6 ATP e 6 NADPH.

Questa energia però non è sempre sufficiente per la fissazione del carbonio (fase oscura della fotosintesi).

Quindi è necessario un processo alternativo/associato alla fotofosforilazione non ciclica.

Trasporto ciclico degli elettroni

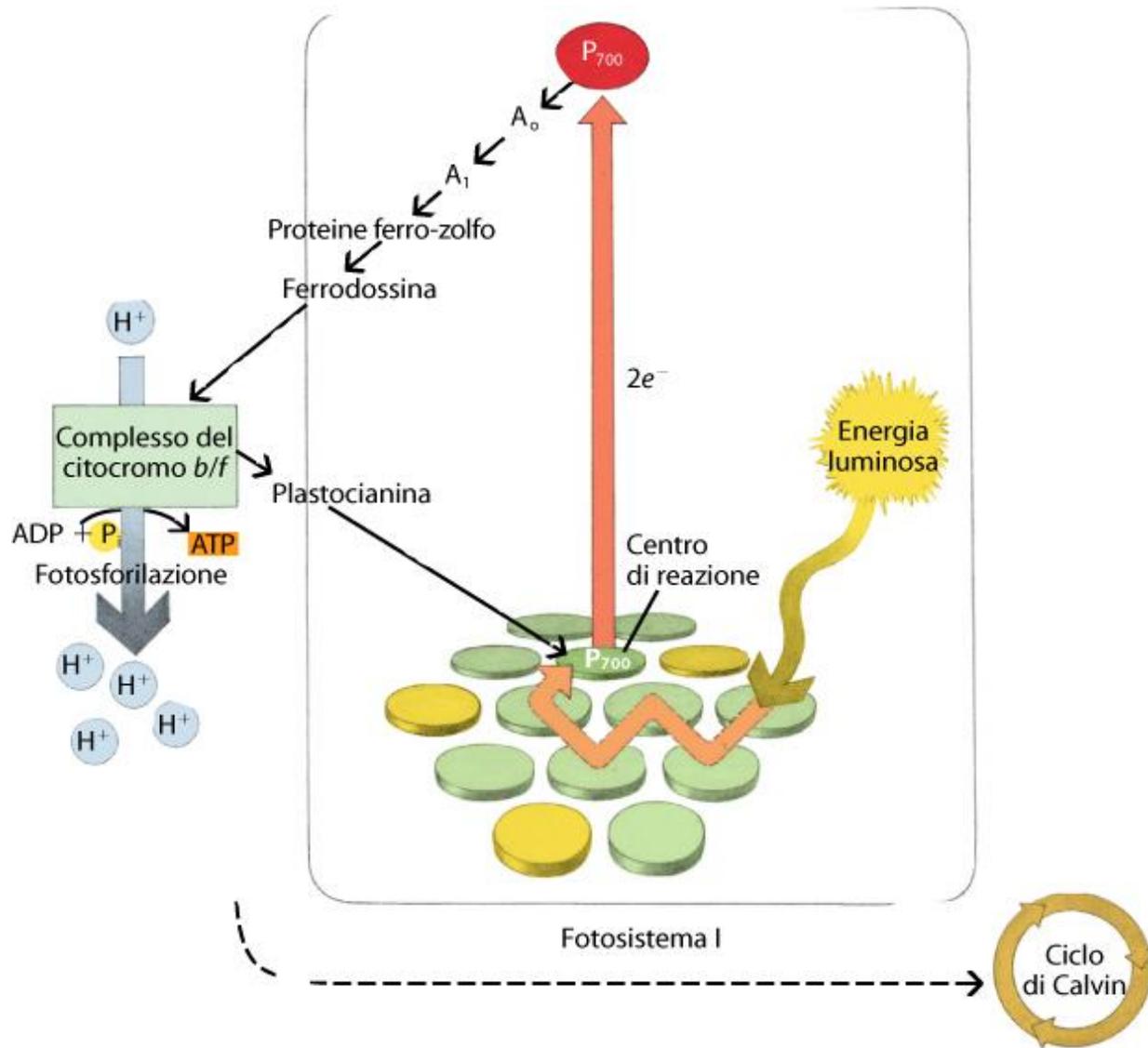
In particolari condizioni:

- piante del sottobosco (luce debole o arricchita in componenti spettrali rosso lontani);
- nei cloroplasti di alcune piante C_4 ,
- se la fissazione di CO_2 richiede un apporto supplementare di ATP;

Il PSI può lavorare anche indipendentemente dal PSII.

Quando il fotosistema I lavora da solo, da origine ad un flusso di e^- ciclico e viene prodotto solo ATP.

Perchè?

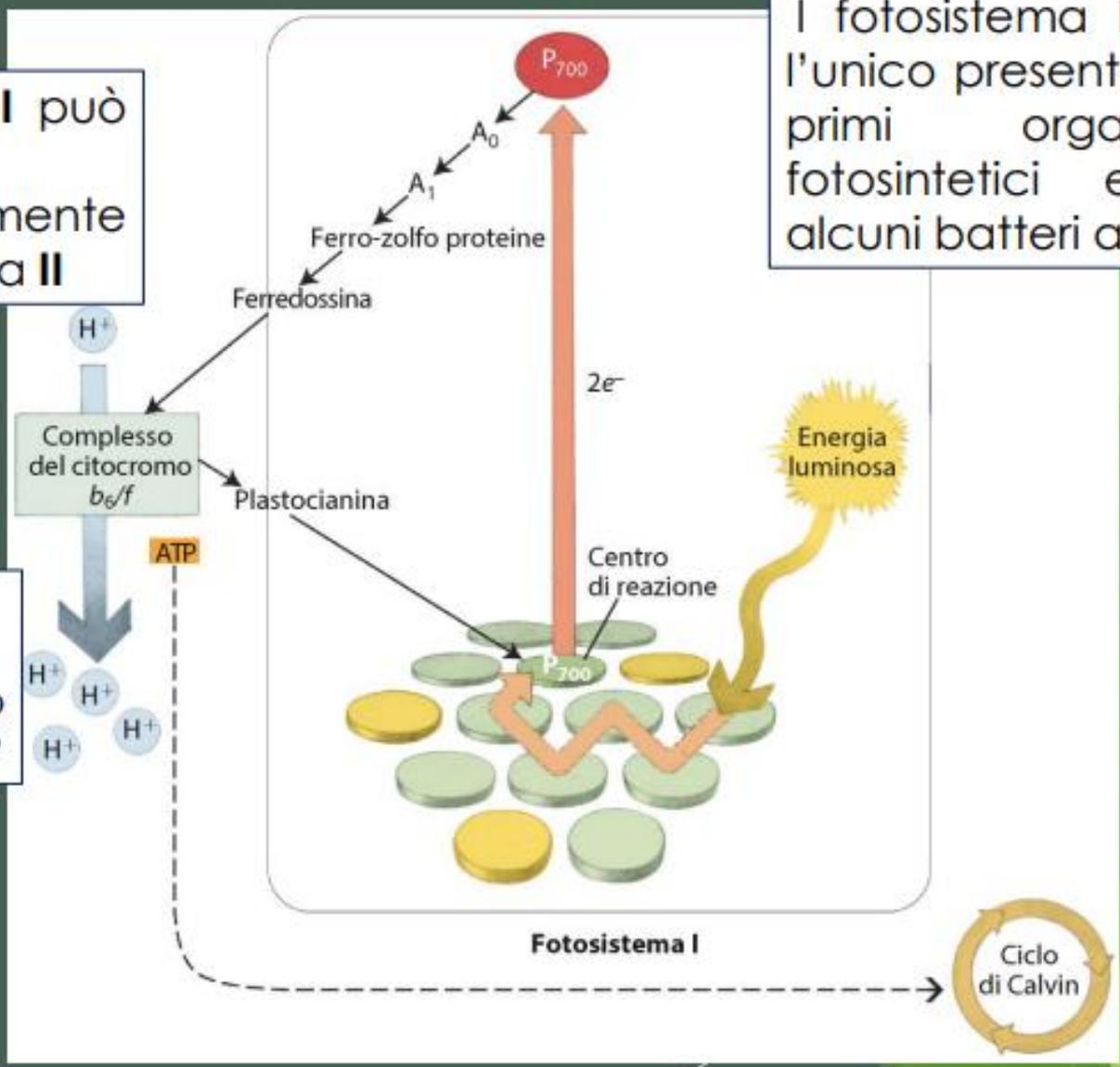


Ricapitolando:

Il fotosistema I può funzionare indipendentemente dal Fotosistema II

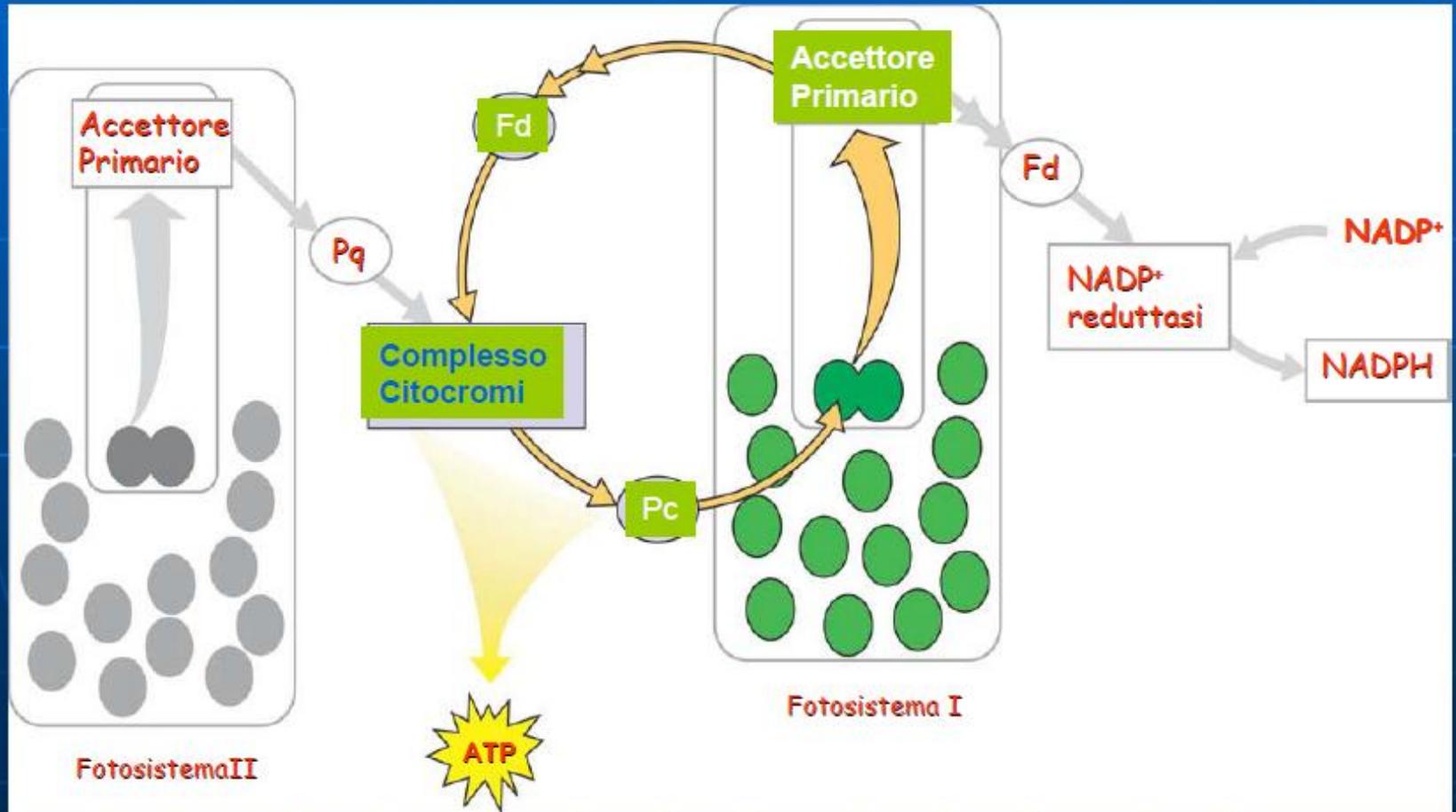
Nella fotofosforilazione ciclica l'unico prodotto è l'ATP

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



Flusso ciclico di elettroni – fotofosforilazione ciclica

Complessivamente



Fotosintesi batterica

Cianobatteri

La fotosintesi attuata dai cianobatteri è simile a quella delle alghe e delle piante superiori.

I cianobatteri hanno clorofilla a, utilizzano l' H_2O come donatori di e^- e liberano O_2 .

Solfobatteri: Batteri purpurei e verdi

I solfobatteri non hanno la clorofilla a, ma altri pigmenti, ed utilizzano acido solfidrico (H_2S) come donatore di e^- e producono zolfo come prodotto di scarto.

Fotosintesi anossigenica
(solfobatteri)

BATTERI PURPUREI

BATTERI VERDI

luce



Fotosintesi batterica che non utilizza acqua come donatore di elettroni e non rilascia ossigeno.

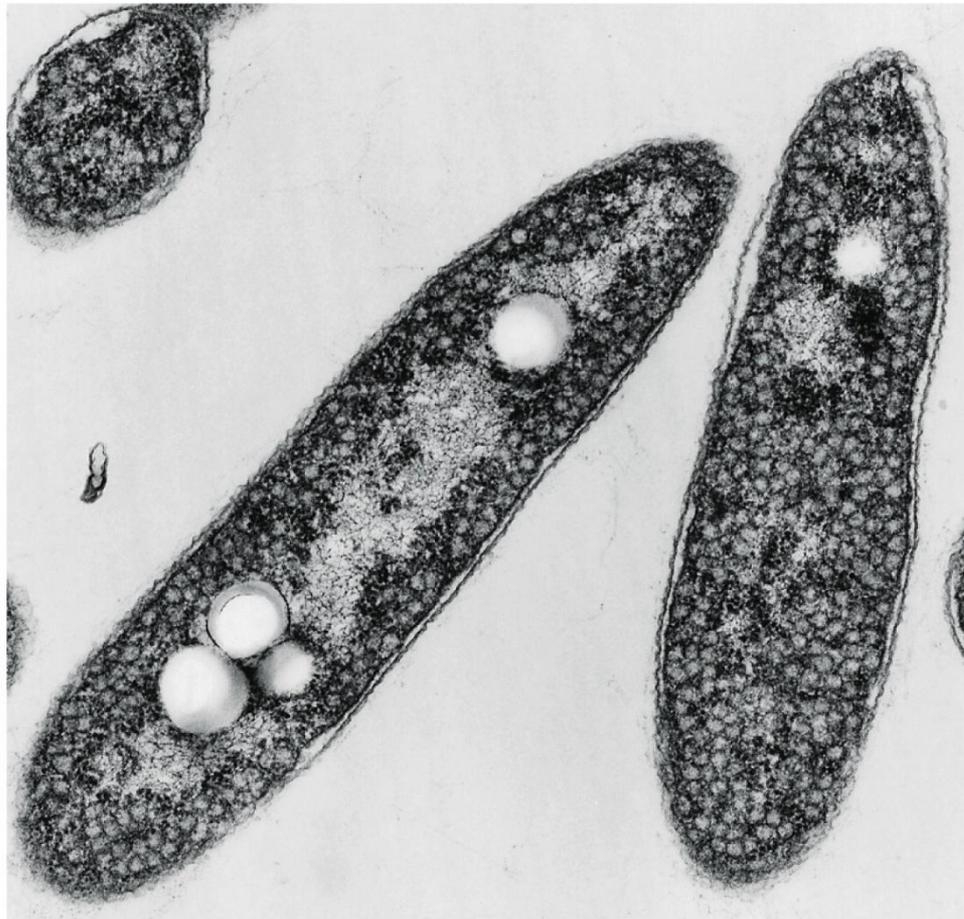
FOTOSINTESI Anossigenica SOLFOBATTERI

Donatore di e^- : $H_2S \rightarrow$ granuli intracellulari di S

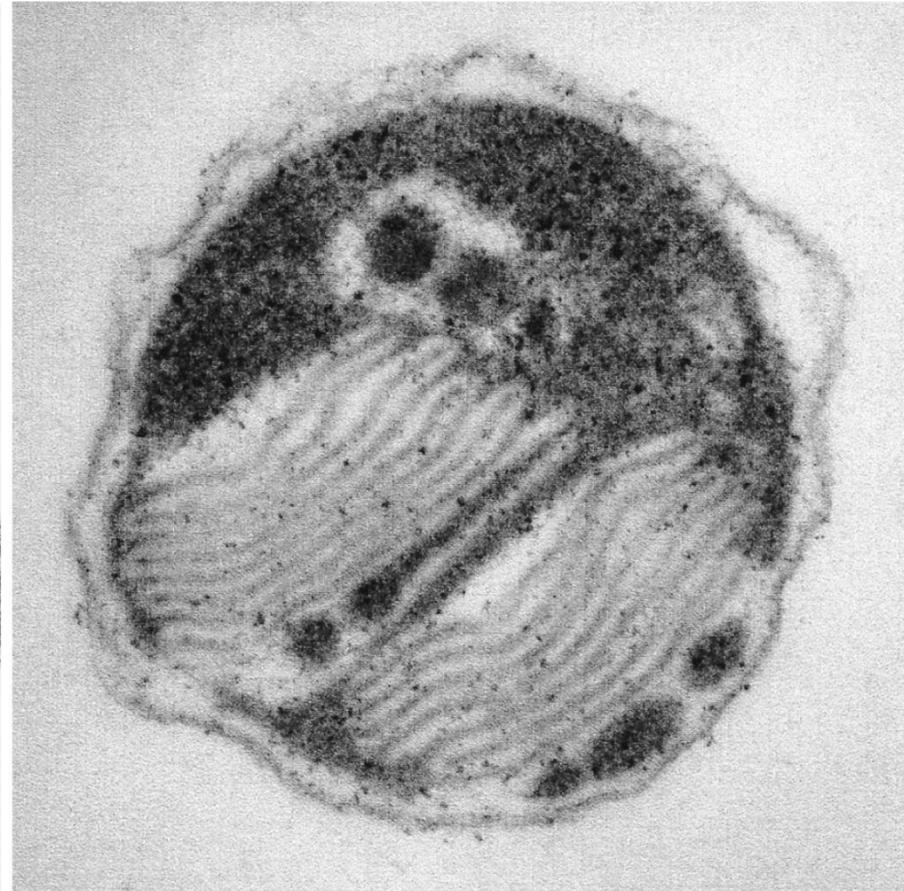
Alcuni possono usare composti organici, ma necessitano di solfuro per riduzione assimilativa

Sistema di **fotopigmenti** localizzato su estesi **ripiegamenti di membrane** plasmatiche (vescicolari, lamellari, tubulari)

FOTOSINTESI Anossigenica BATTERI PURPUREI SOLFUREI



(a) Invaginazioni tubulari



(b) Invaginazioni lamellari

Steven J. Schmitt and M.T. Madigan

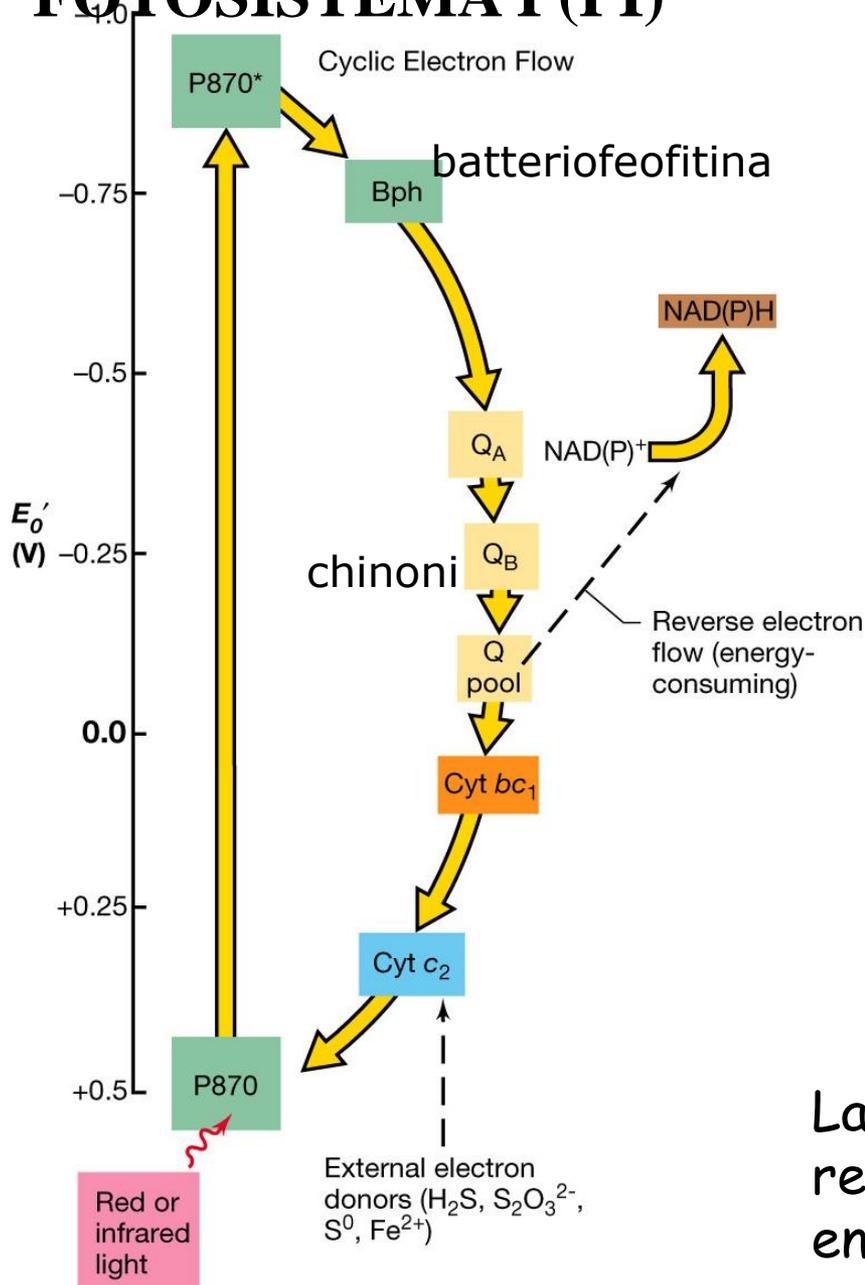
FOTOSINTESI Anossigenica

BATTERI PURPUREI SOLFUREI

Pigmenti fotosintetici: batterioclorofilla a (soprattutto)
carotenoidi (→ colore - soprattutto
licopene)

FOTOSINTESI ANOSSIGENICA

FOTOSISTEMA I (PI)



Questi batteri utilizzano un solo fotosistema: il PSI i batteri verdi e il PSII i batteri purpurei.

Il flusso di elettroni nei solfobatteri è sempre ciclico.

In questo processo fotosintetico, gli e^- della batterioclorofilla ricevono meno energia di quella della clorofilla a e non riescono a ridurre l' $NADP^+$ a NADPH.

La sintesi di NADPH avviene mediante reazioni chimiche che richiedono energia sotto forma di ATP.