

ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΕΙΑΣ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

# ΜΙΚΡΟΒΙΟΛΟΓΙΑ

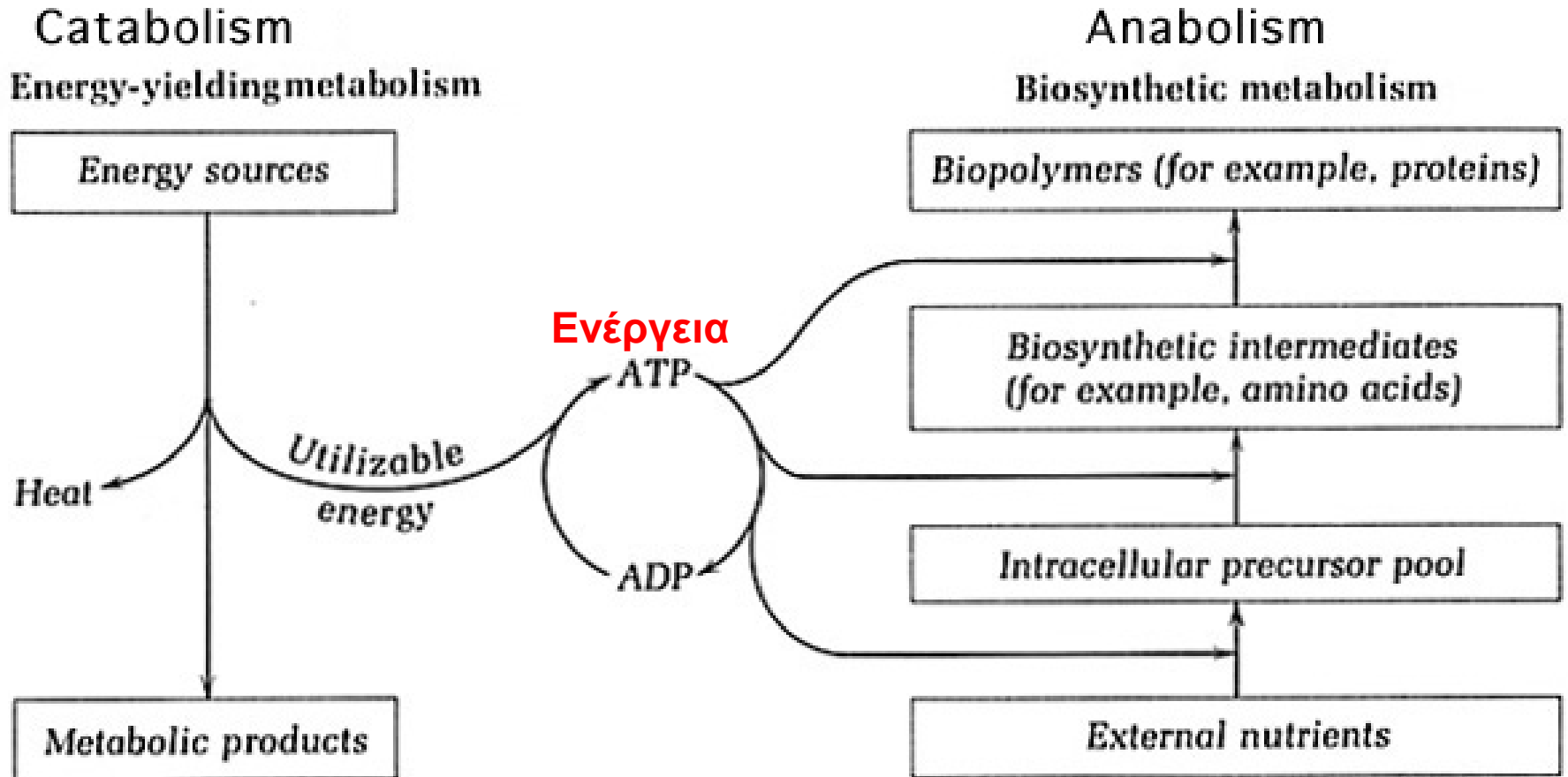
Ενότητα γ'

Μικροβιακός Μεταβολισμός

ΑΛΕΞΙΟΣ ΒΛΑΜΗΣ  
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

# 1. Εισαγωγή-βασικές έννοιες

# Μεταβολικοί δρόμοι



# Ορισμοί

**Μεταβολισμός:** το σύνολο των διεργασιών μέσω των οποίων ουσίες του περιβάλλοντος μετατρέπονται σε υλικά του κυττάρου.

**Αναβολισμός:** βιοσύνθεση συνθέτων ενώσεων, απαιτεί ενέργεια.

**Καταβολισμός:** οξείδωση ουσιών (πχ σακχάρων) για παραγωγή ενέργειας.

**Ετερότροφοι οργανισμοί:** χρήση οργανικών ουσιών για ενέργεια και πηγή C. Αναπνοή ή ζύμωση για την παραγωγή ενέργειας.

**Αυτότροφοι:** χρήση CO<sub>2</sub> ως πηγή C.

**Χημειοαυτότροφοι:** χρήση απλών ανοργάνων ή οργανικών ουσιών για πηγή ενέργειας.

**Φωτοαυτότροφοι:** χρήση φωτός για πηγή ενέργειας.

Η σύνδεση αναβολισμού και καταβολισμού πραγματοποιείται μέσω μορίων που χρησιμοποιούνται από τον αναβολισμό ενώ παράγονται από τον καταβολισμό.

## 2. ΚΑΤΑΒΟΛΙΣΜΟΣ

# Βιοχημική περίληψη καταβολισμού

1. Ουσίες υψηλής ενέργειας (π.χ. σάκχαρα) αποτελούν την αρχική πηγή της ενέργειας.
2. Οι ουσίες αυτές αποδομούνται (καταβολίζονται) με διαφορετικούς τρόπους (πχ, η αερόβια ή αναερόβια οξείδωση της γλυκόζης, ζύμωση κ.α.).

## **3. Η ενέργεια από την αποδόμηση των ουσιών χρησιμοποιείται για την παραγωγή ATP.**

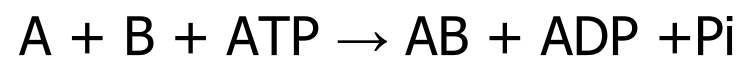
4. Το μόριο ATP χρησιμοποιείται από όλους τους οργανισμούς σαν τον ενδιάμεσο μόριο καταβολισμού-αναβολισμού.

**5. Παράγεται επίσης και NADH** το οποίο δίνει ηλεκτρόνια στην αναπνευστική αλυσίδα κι έτσι παράγεται περισσότερο ATP.

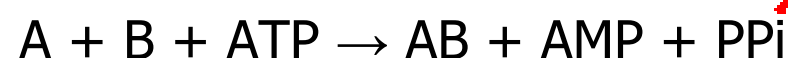


**ΑΤΡ:** το νουκλεοτίδιο που αποθηκεύει την ενέργεια προερχόμενη από τον καταβολισμό

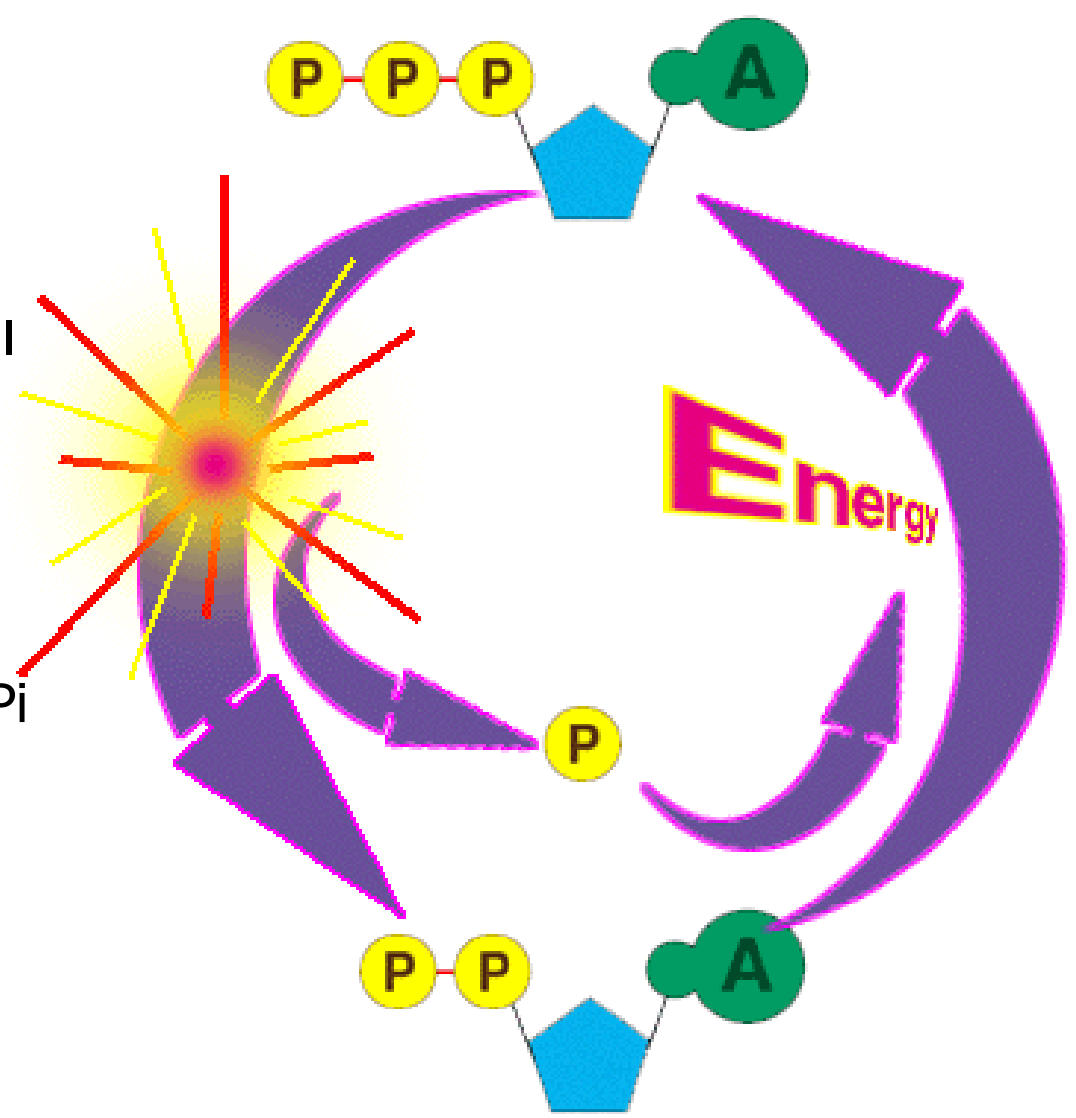
Η ενέργεια χρησιμοποιείται στον αναβολισμό:



ή



Αναγέννηση του ΑΤΡ από την αδενυλική κυκλάση:



# Κύριοι οδοί παραγωγής ενέργειας (ATP) στο μικροβιακό κύτταρο

## 1. Οξειδωτική φωσφορυλίωση

Αναγέννηση ATP από την κλίση  $H^+$  εγκαρσίως της κυτταροπλασματικής μεμβράνης (πυροσταφυλικό και μετά). Παράδειγμα: αναπνευστική αλυσίδα.

## 2. Φωσφορυλίωση σε επίπεδο υποστρώματος

Αναγέννηση ATP (ή GTP) στο κυτταρόπλασμα από τη μεταφορά μιας φωσφορικής ομάδας ( $PO_3$ ) σε ADP (ή GDP) από ένα **φωσφορυλιωμένο μόριο υψηλής ενέργειας** μέσω κατάλληλης κινάσης (π.χ. PEP και καρβόξυ-κινάση του φωσφο-ενόλο-πυροσταφυλικού). Παράδειγμα: γλυκόλυση/ζυμώσεις.



# Βιοχημικοί οδοί παραγωγής ενέργειας από τους οργανισμούς κατά τον καταβολισμό

2.1. Γλυκόλυση και Αεροβική αναπνοή

2.2. Άλλα θέματα σχετικά με τη γλυκόλυση/καταβολισμό

2.3. Καταβολισμός λιπαρών οξέων

2.4. Καταβολισμός πρωτεϊνών

2.5. Ζυμώσεις (πρωτογενείς και δευτερογενείς)

2.6. Αναεροβική αναπνοή

## **2.1. Γλυκόλυση και Αεροβική κυτταρική αναπνοή**

# 2.1. Γλυκόλυση και Αεροβική κυτταρική αναπνοή

## Καταβολισμός γλυκόζης και Οξειδωτική φωσφορυλίωση

Η ροή πρωτονίων ( $H^+$ ) στο περίπλασμα λόγω μεταφοράς ηλεκτρονίων από την αναπνευστική αλυσίδα στο  $O_2$ , δημιουργεί κλίση συγκέντρωσης  $H^+$  μεταξύ περιπλάσματος και κυτοσολίου.

Η εισροή των πρωτονίων στο κυτταρόπλασμα μέσω ειδικής πρωτεΐνης-μεταφορέα χρησιμοποιείται για τη σύνθεση του ATP.

- 4 στάδια
- 2.1.1 Γλυκόλυση
- 2.1.2 Μεταβατική αντίδραση
- 2.1.3 Κύκλος του Krebs
- 2.1.4 Αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων

# Γλυκόλυση: 4 διαφορετικοί γλυκολυτικοί οδοί στα βακτήρια:

1. Καταβολική οδός Embden-Meyerhoff-Parnas (EMP)
  - “Κλασσική” γλυκόλυση (66-80 %).
  - Σχεδόν σε όλους τους οργανισμούς.
2. Οξειδωτικός κύκλος των φωσφοροπεντοζών (PPP)
  - Υπάρχει στους περισσότερους οργανισμούς.
  - Σύνθεση πεντοζών που χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση των νουκλεοτιδίων.
3. Καταβολική οδός Entner-Doudoroff (ED)
  - Στην *Pseudomonas*, σχετιζόμενα γένη *Enterococcus* και μερικά αρχαία που δε διαθέτουν φωσφοφρουκτοκινάση.
4. Καταβολική οδός φωσφοροκετολάσης
  - Ετεροζυμωτικά γαλακτικά βακτήρια και οξεοβακτήρια, π.χ. Στα *Bifidobacterium* (γαλακτικά βακτήρια) και *Leuconostoc mesenteroides*.

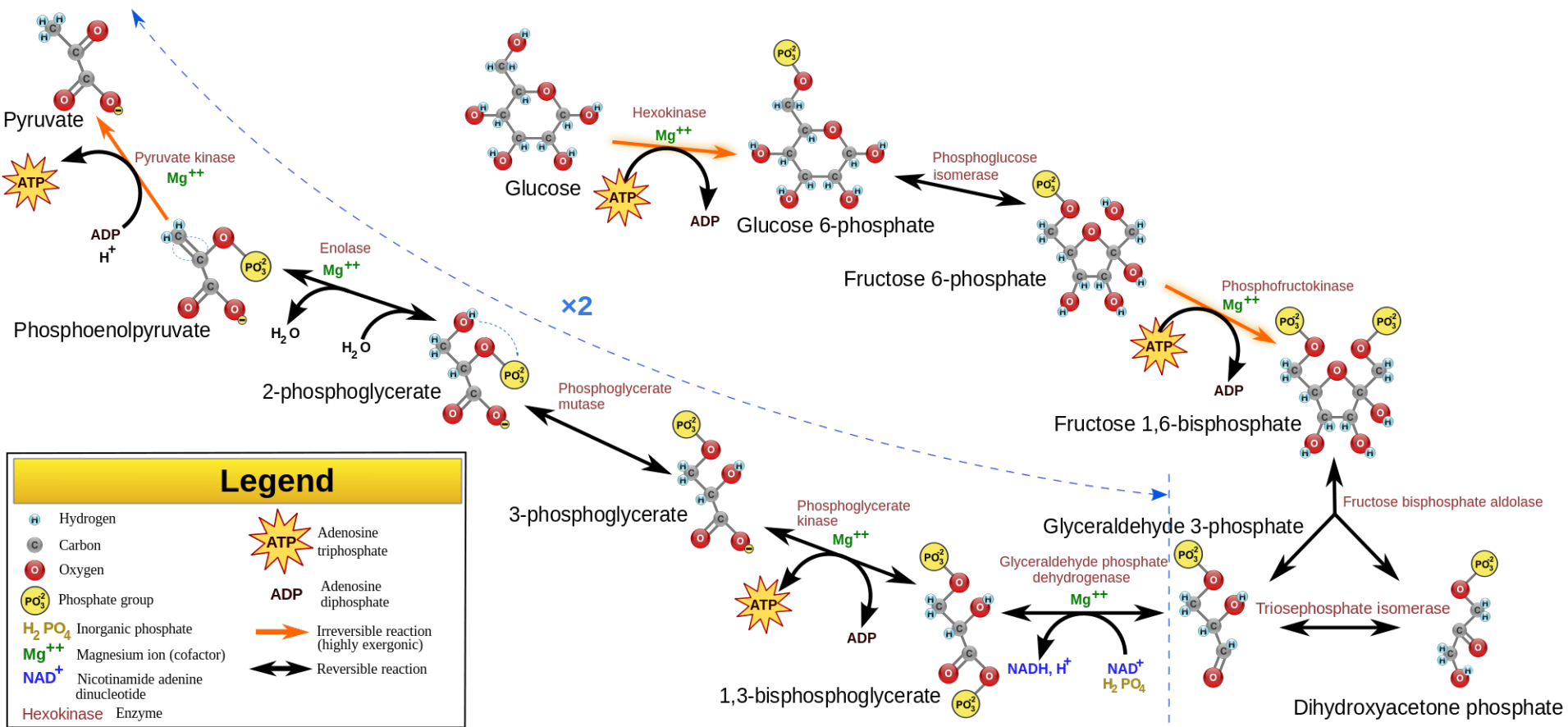
Η διαφορά έγκειται μέσω ποίων ενδιάμεσων καταλήγουμε στην **φωσφορική γλυκεραλδεΐδη** και στο **πυροσταφυλικό οξύ**

## 2.1.1.1 «Κλασσική» γλυκόλυση

- Οξειδωση ενός μορίου γλυκόζης σε 2 μόρια πυροσταφυλικού οξέως.
- Γνωστή και ως καταβολική οδός Embden-Meyerhof στα ευκαρυωτικά κύτταρα.
- Δεν σχετίζεται απαραίτητα με τον αερόβιο μεταβολισμό.
- **Τελικά προϊόντα:**
  - 2 πυροσταφυλικά οξέα
  - 2 NADH + 2 H<sup>+</sup>
  - 2 ATP

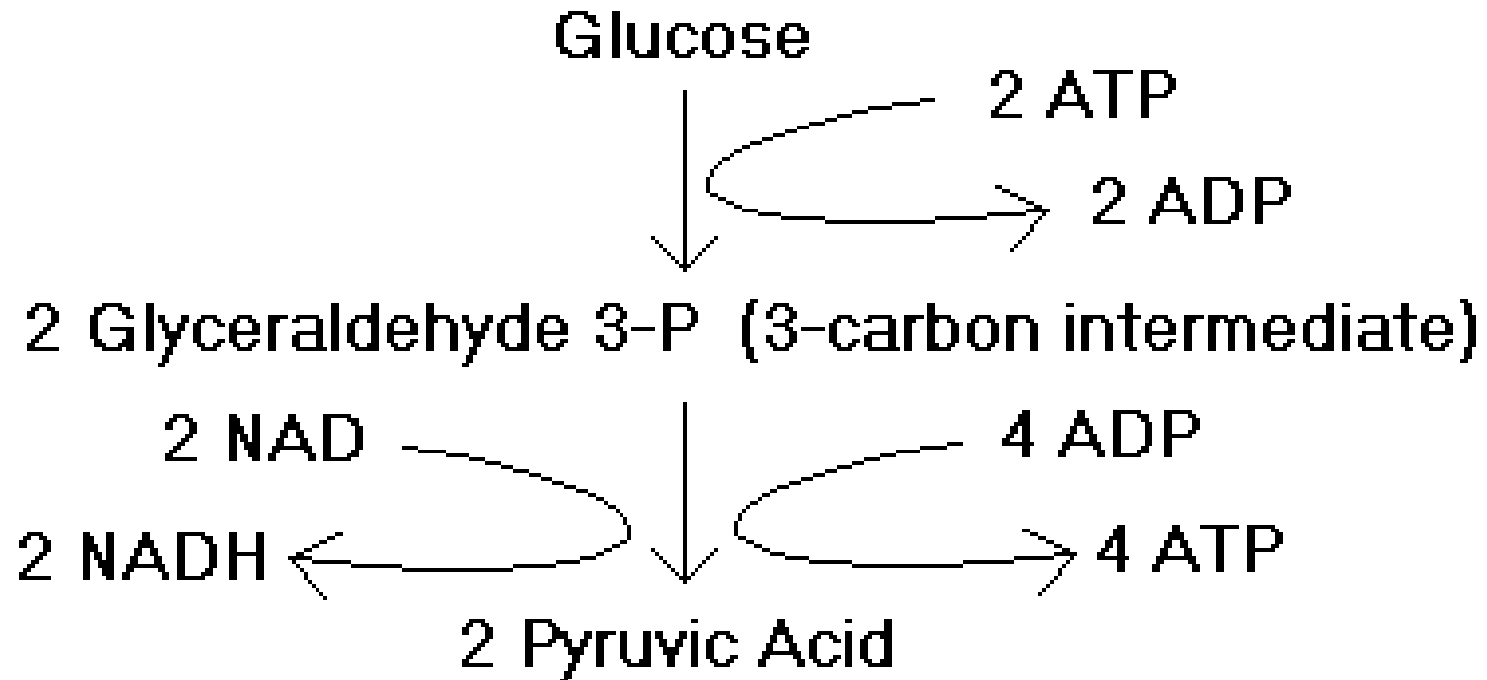
# Καταβολισμός: οξείδωση ουσιών (πχ σακχάρων) για παραγωγή ενέργειας

## 2.1.1.1. Καταβολική οδός Embden-Meyerhof-Parnas (EMP) ΓΛΥΚΟΛΥΣΗ



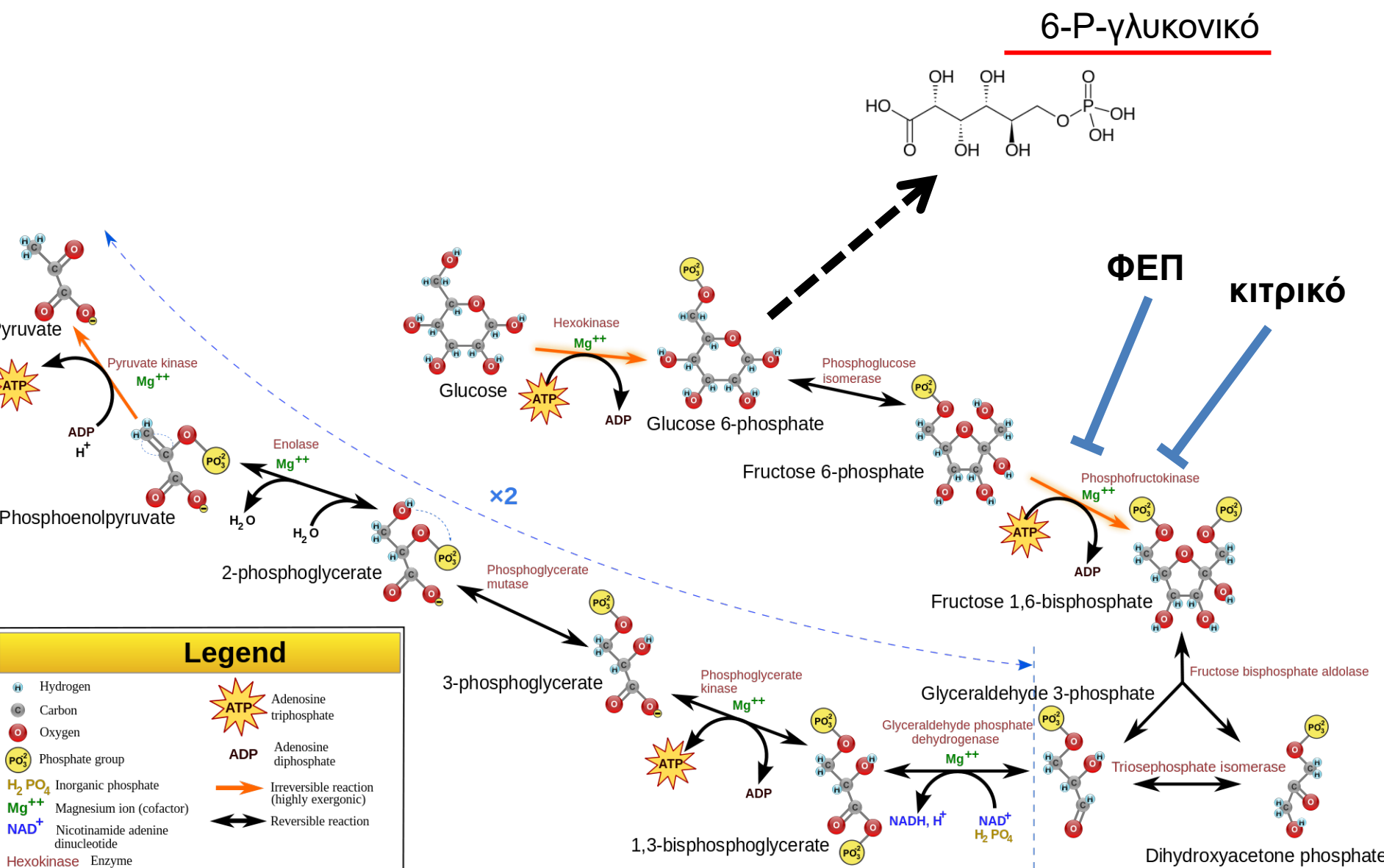
# Καταβολική οδός Embden-Meyerhoff-Parnas (EMP)

## Σύνοψη:

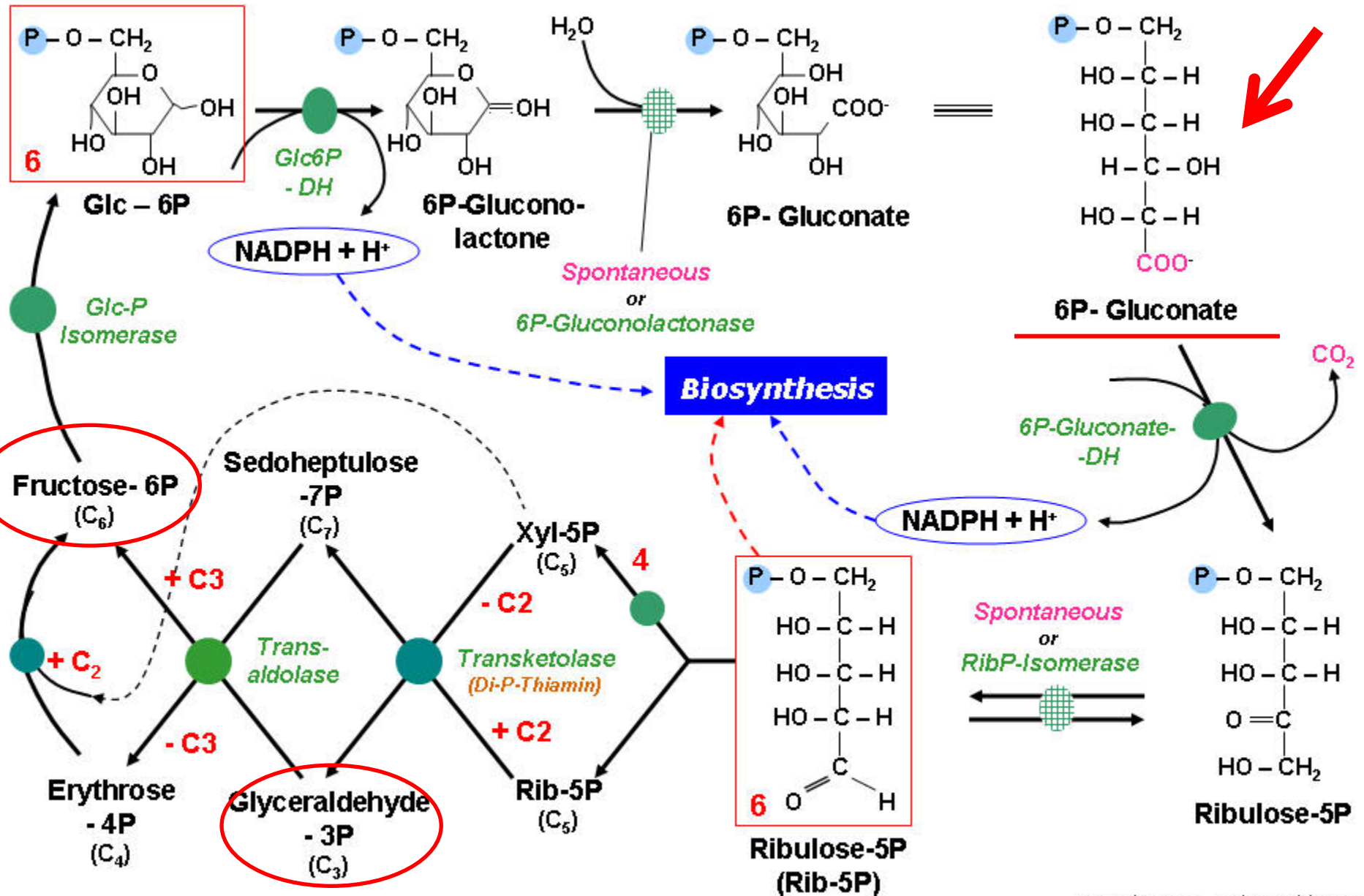


# 2.1.1.2. Καταβολική οδός φωσφοροπεντοζών (PPP)

Αρχικά: Καταβολική οδός Embden-Meyerhof-Parnas (EMP)



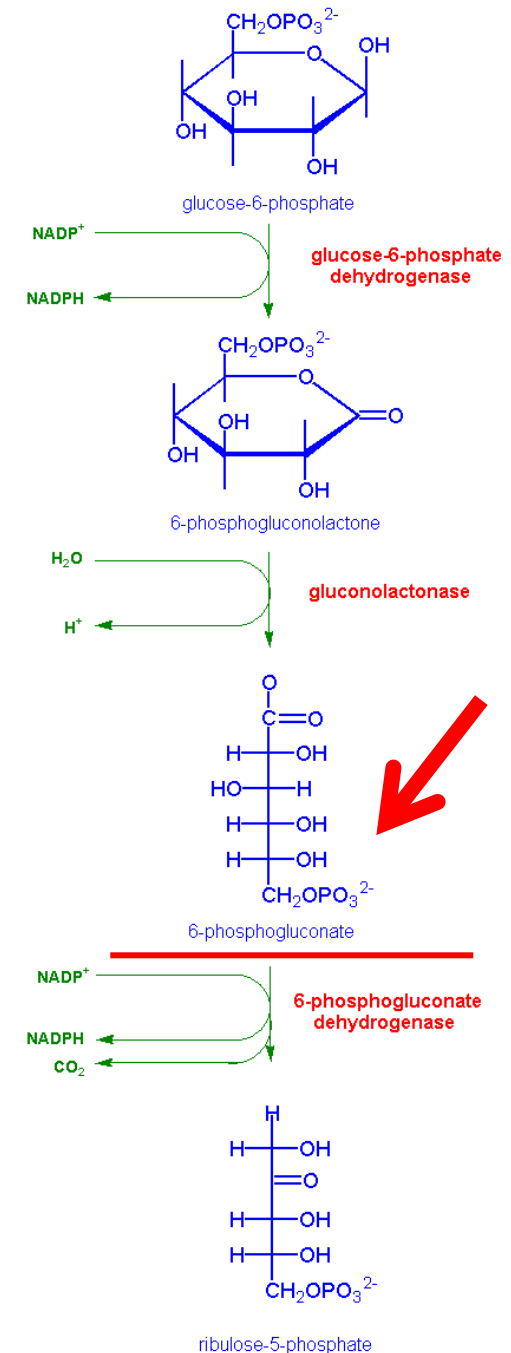




## 2.1.1.2. Καταβολική οδός φωσφοροπεντοζών (PPP)

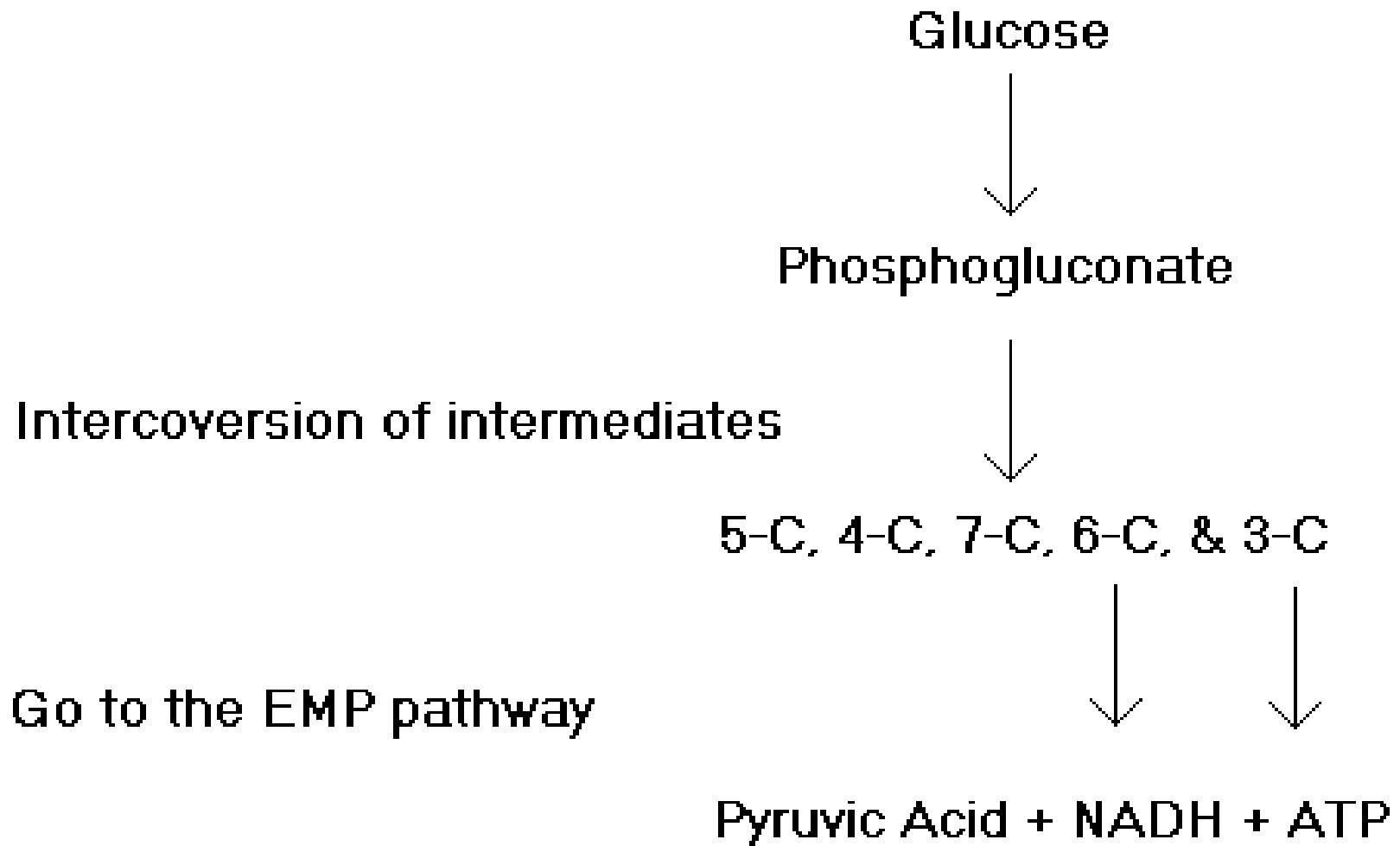
- Αποδομή 5-6 C
- Κυταροπλασματική
- Αναεροβική
- Τελικά προϊόντα
  - 1 ATP
  - 2 NADPH
  - CO<sub>2</sub>
  - 4,5,6,7 C
    - αμινοξέα
    - νουκλεοτίδια
    - Γλυκολυτικοί δρόμοι
    - φωτοσύνθεση

### Oxidative Stage of Pentose Phosphate Pathway



# Καταβολική οδός φωσφοροπεντοζών (PPP)

Σύνοψη:



## 2.1.1.3. Καταβολική οδός Entner-Doudoroff (ED)

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC545716/>

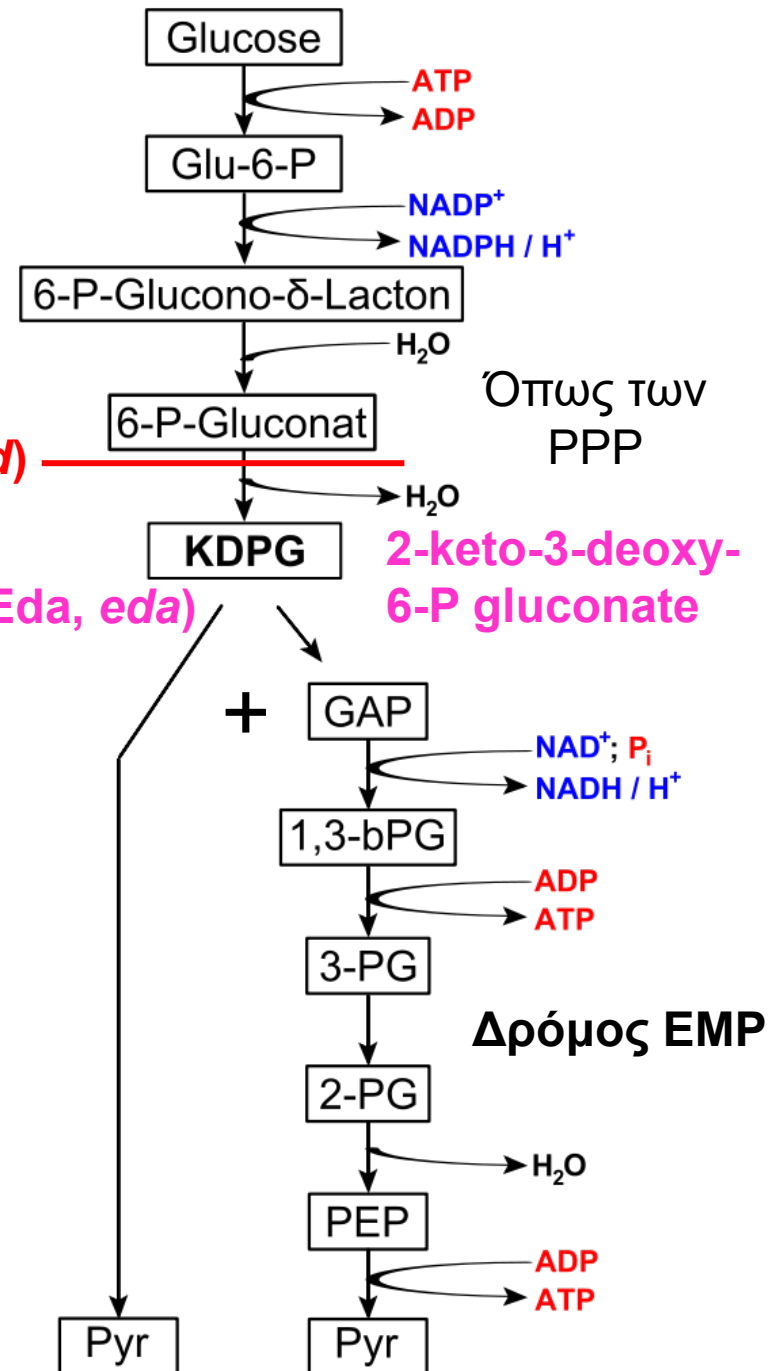
**Phosphogluconate dehydratase (*edd*)**

**2-dehydro-3-deoxy-phosphogluconate aldolase (*Eda, eda*)**

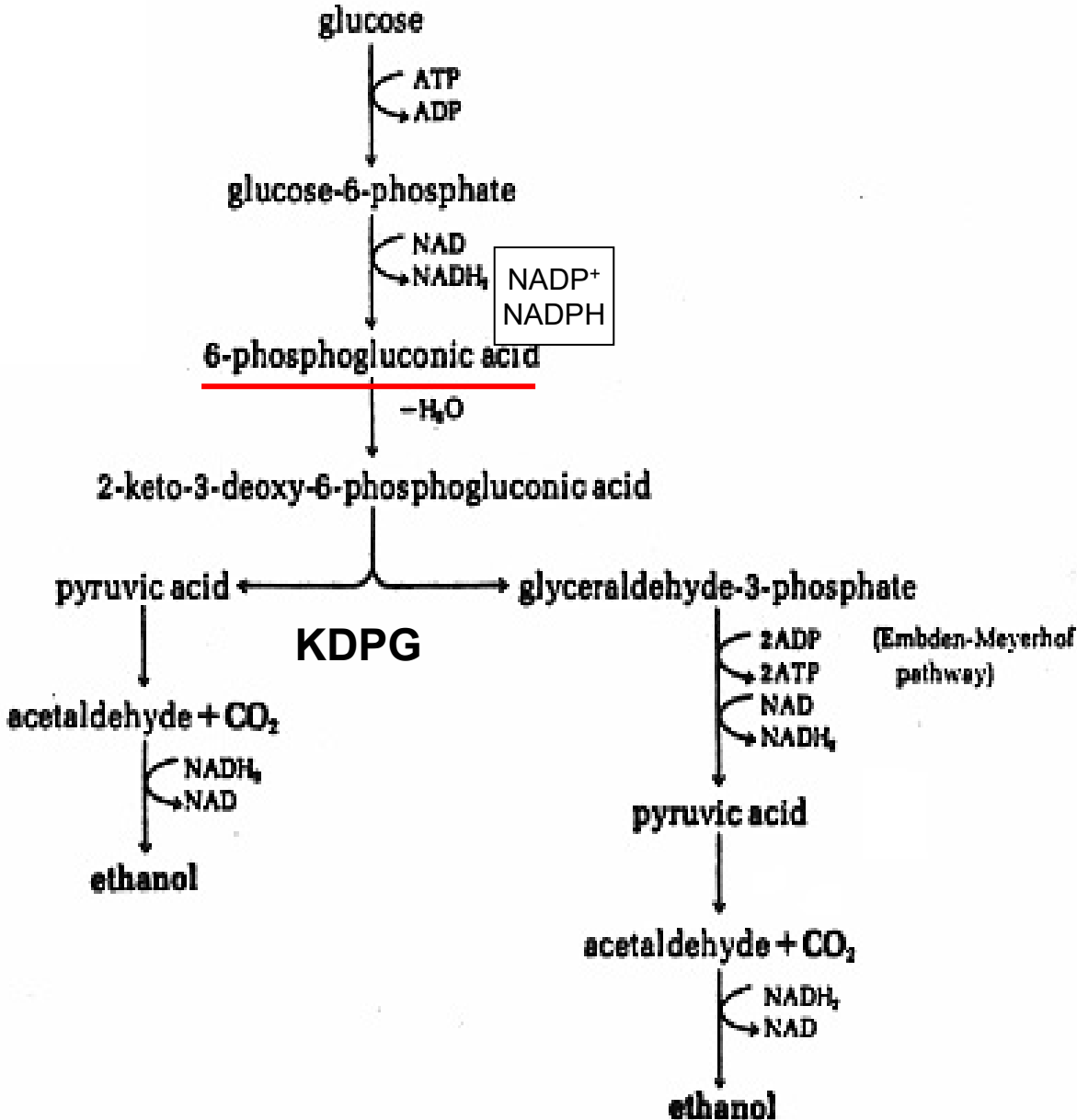
[J Bacteriol.](#) 2005 Feb;187(3):991-1000.

**Multiple regulators control expression of the Entner-Doudoroff aldolase (*Eda*) of *E. coli*.**

The *Escherichia coli eda* gene, which encodes the Entner-Doudoroff aldolase, is central to the catabolism of several sugar acids. **Here, we show that *Eda* synthesis is induced by growth on gluconate, glucuronate, or methyl-beta-D-glucuronide; phosphate limitation; and carbon starvation.** Transcription of *eda* initiates from three promoters, designated P1, P2, and P4, each of which is responsible for induction under different growth conditions.



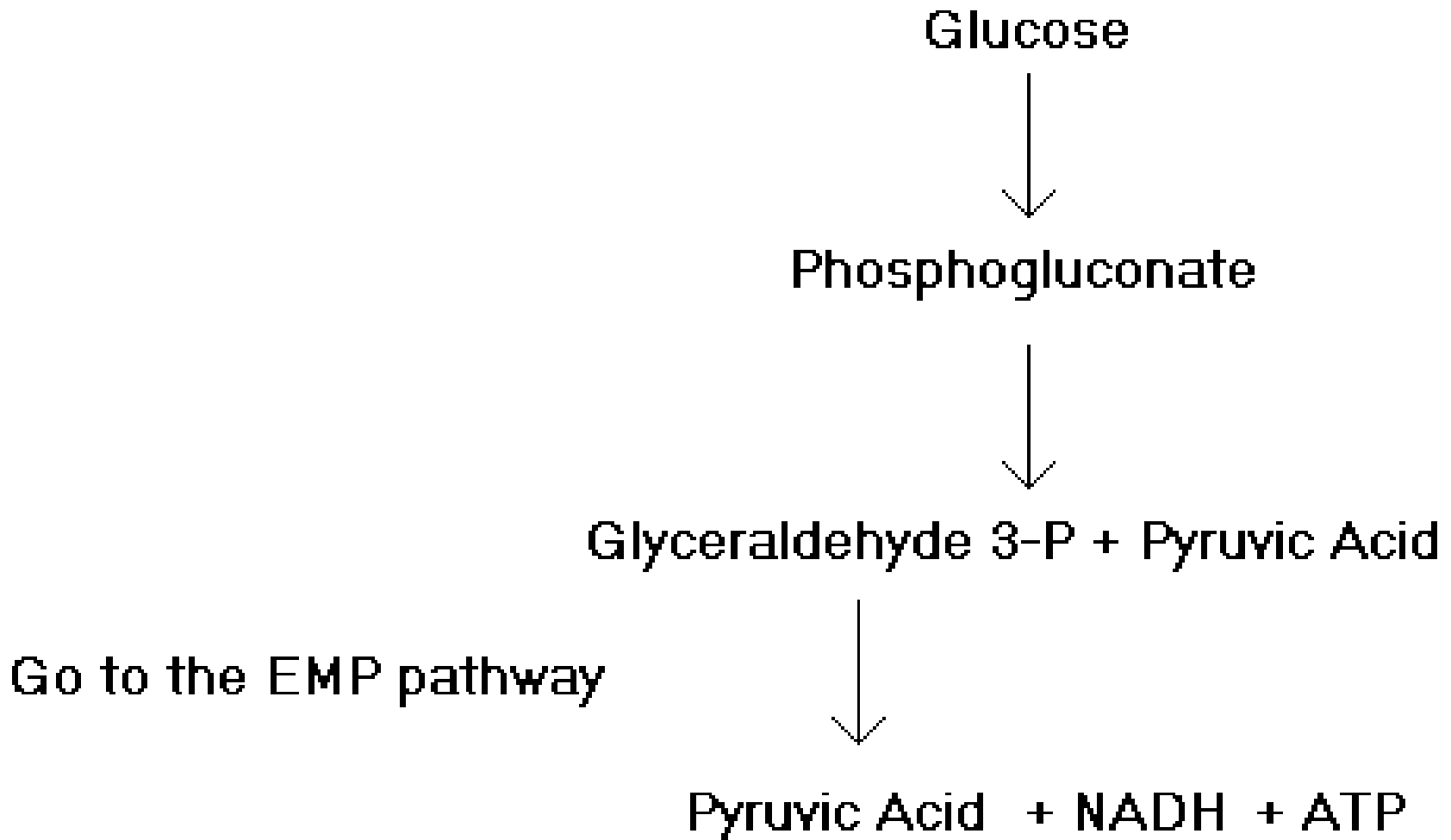
# Καταβολική οδός Entner-Doudoroff (ED)



- Γλυκολυτική
- Κυτταρόπλασμα
- Δεν απαιτεί O
- Διαφορετικά ένζυμα
  - *Pseudomonas*
  - *Enterococcus*
- Τελικά προϊόντα
  - 2-1 = 1 ATP
  - NADPH
  - NADH
  - 2 πυροσταφυλικά
  - H<sub>2</sub>O

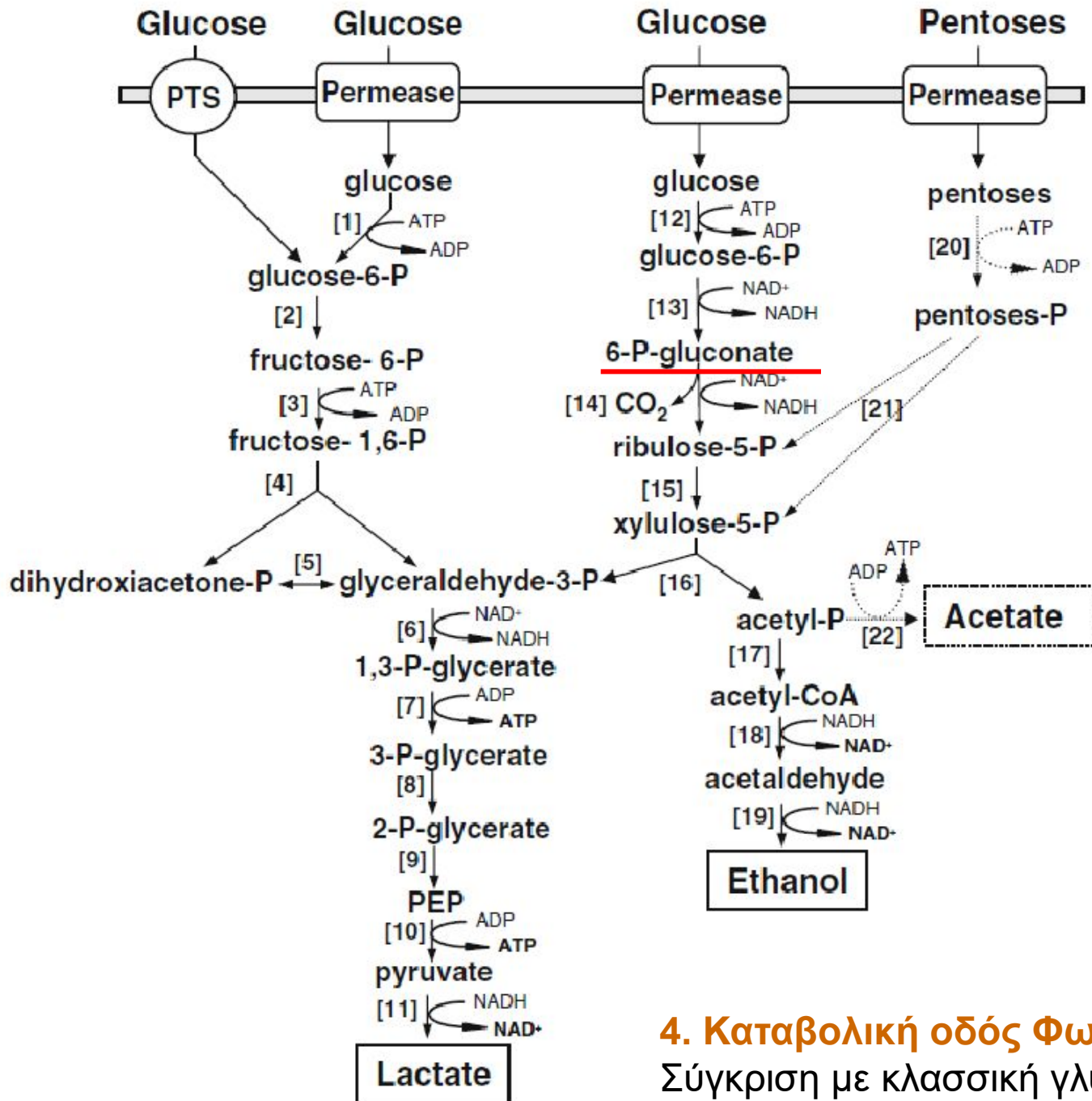
# Καταβολική οδός Entner-Doudoroff (ED)

## Σύνοψη:



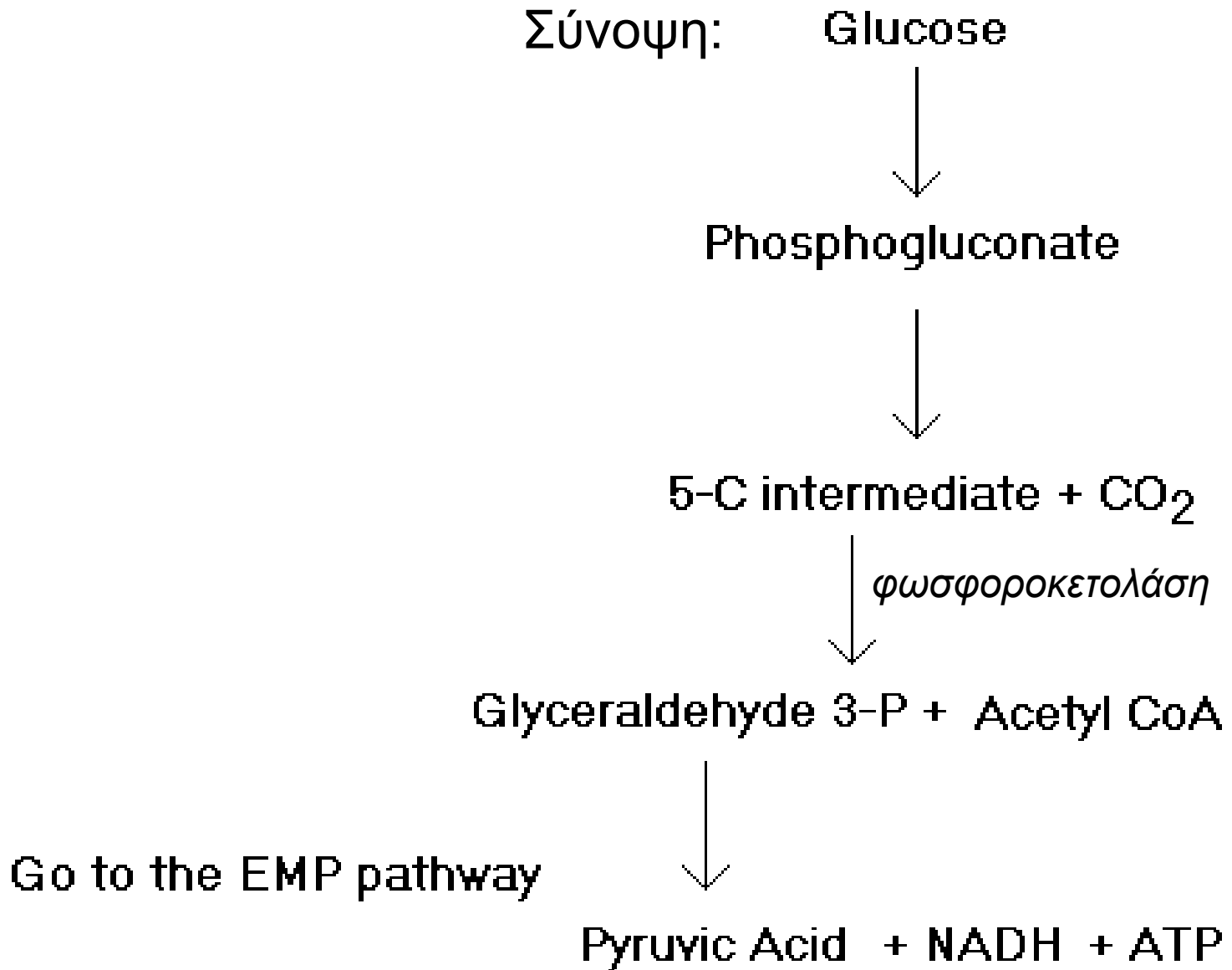
# GLYCOLYSIS

# PHOSPHOKETOLASE PATHWAY



4. Καταβολική οδός Φωσφοκετολάσης  
Σύγκριση με κλασσική γλυκόλυση

## 2.1.1.4. Καταβολική οδός φωσφοροκετολάσης



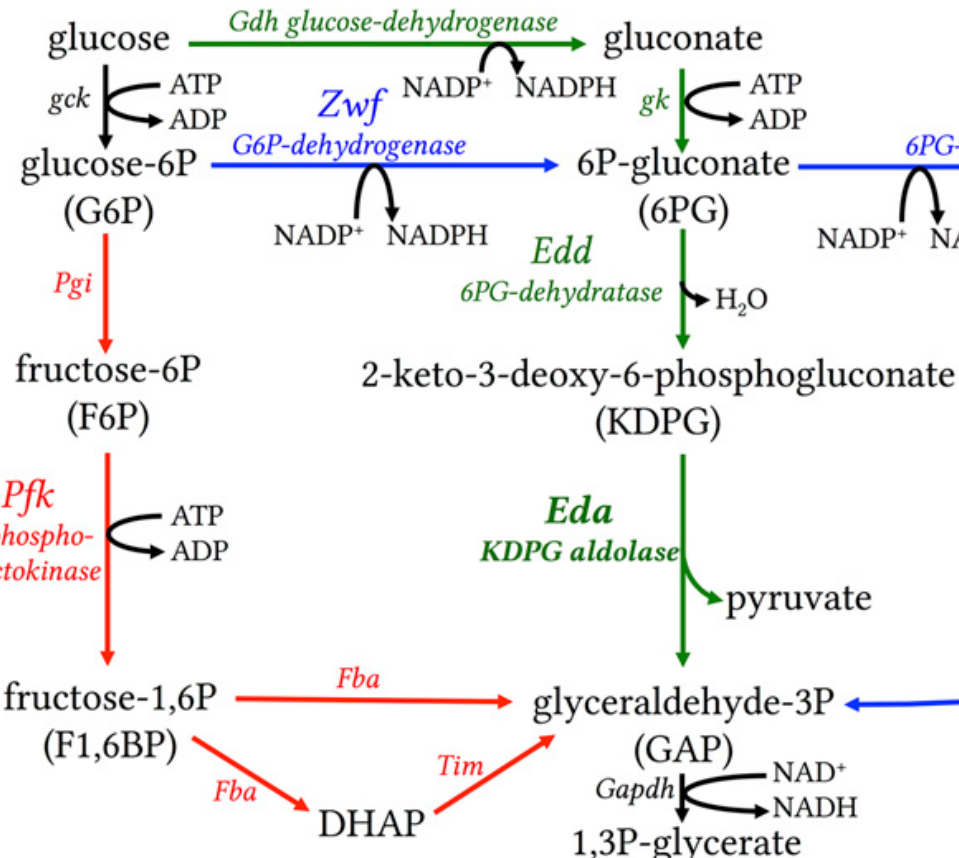


## Σύγκριση γλυκολυτικών οδών

	“Κλασσική” γλυκόλυση EMP	PPP	Entner-Doudoroff
Προϊόντα	2 πυροσταφυλικά 2 ATP  2 NADH 2 H <sup>+</sup>	πυροσταφυλικό κ φρουκτόζη 6 CO <sub>2</sub> 12 NADPH  12 H <sup>+</sup>	2 πυροσταφυλικά 1 ATP 1 NADPH 1 NADH 2 H <sup>+</sup>

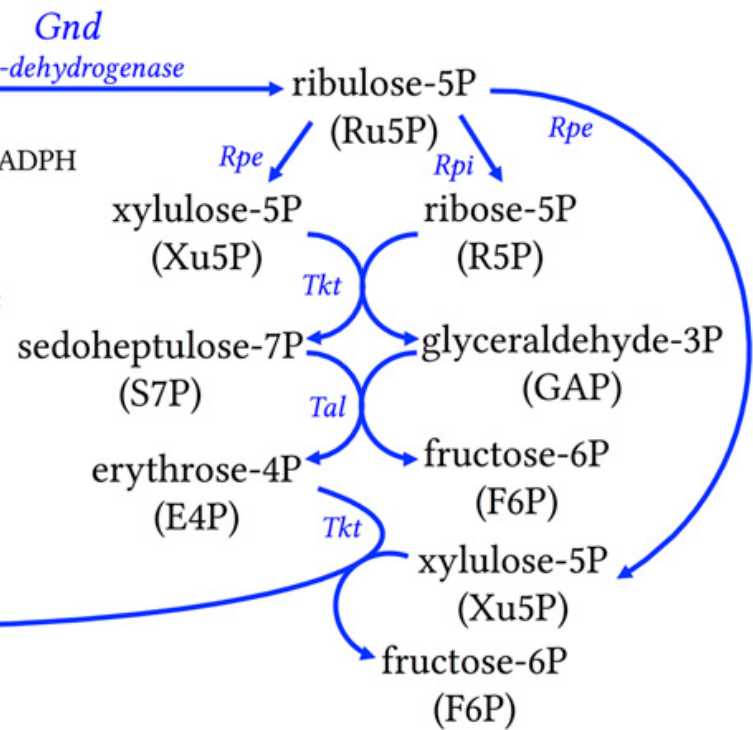
# Σύνοψη γλυκολυτικών δρόμων

## Καταβολική οδός Entner-Doudoroff (ED)



## Καταβολική οδός Embden-Meyerhof-Parnas (EMP)

## Καταβολική οδός φωσφοροπεντοζών (PPP)

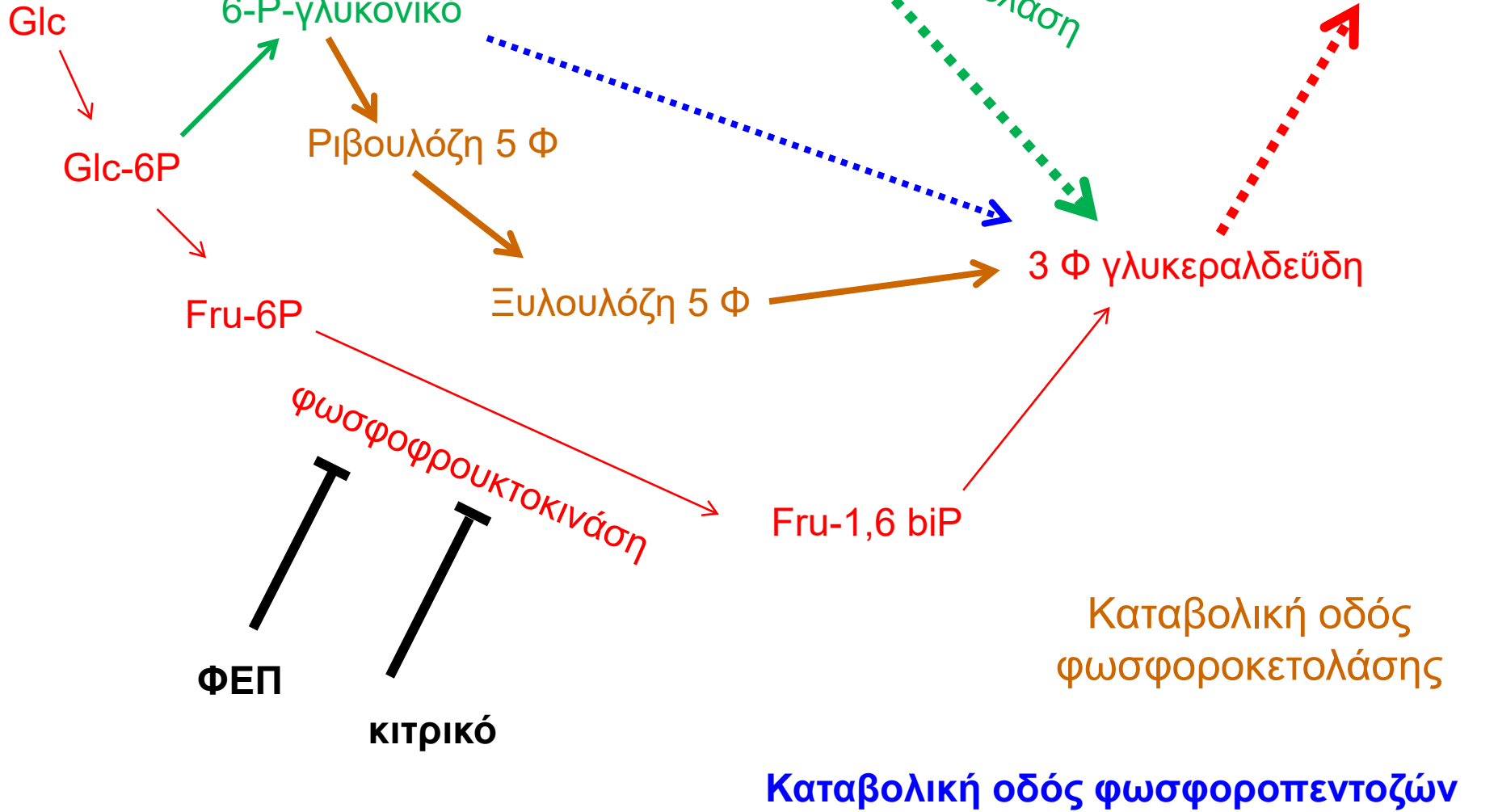


Λείπει η καταβολική οδός της φωσφοροκετολάσης

<http://www.pnas.org/content/113/19/5441.full.pdf>

# Καταβολική οδός Entner-Doudoroff

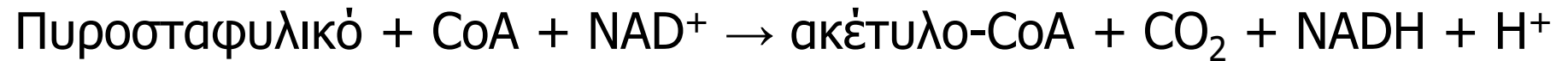
**Κλασική  
γλυκόλυση**



# Γλυκολυτικοί οδοί για διαφορετικά είδη

	<b>EMP</b>	<b>PPP</b>	<b>ED</b>
<i>Acetobacter aceti</i>	-	+	-
<i>Bacillus subtilis</i>	κύρια	ελλάσων	-
<i>E. coli</i>	+	-	-
<i>Lactobacillus acidophilus</i>	+	-	-
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	-	-	+
<i>Vibrio cholera</i>	ελλάσων	-	κύρια

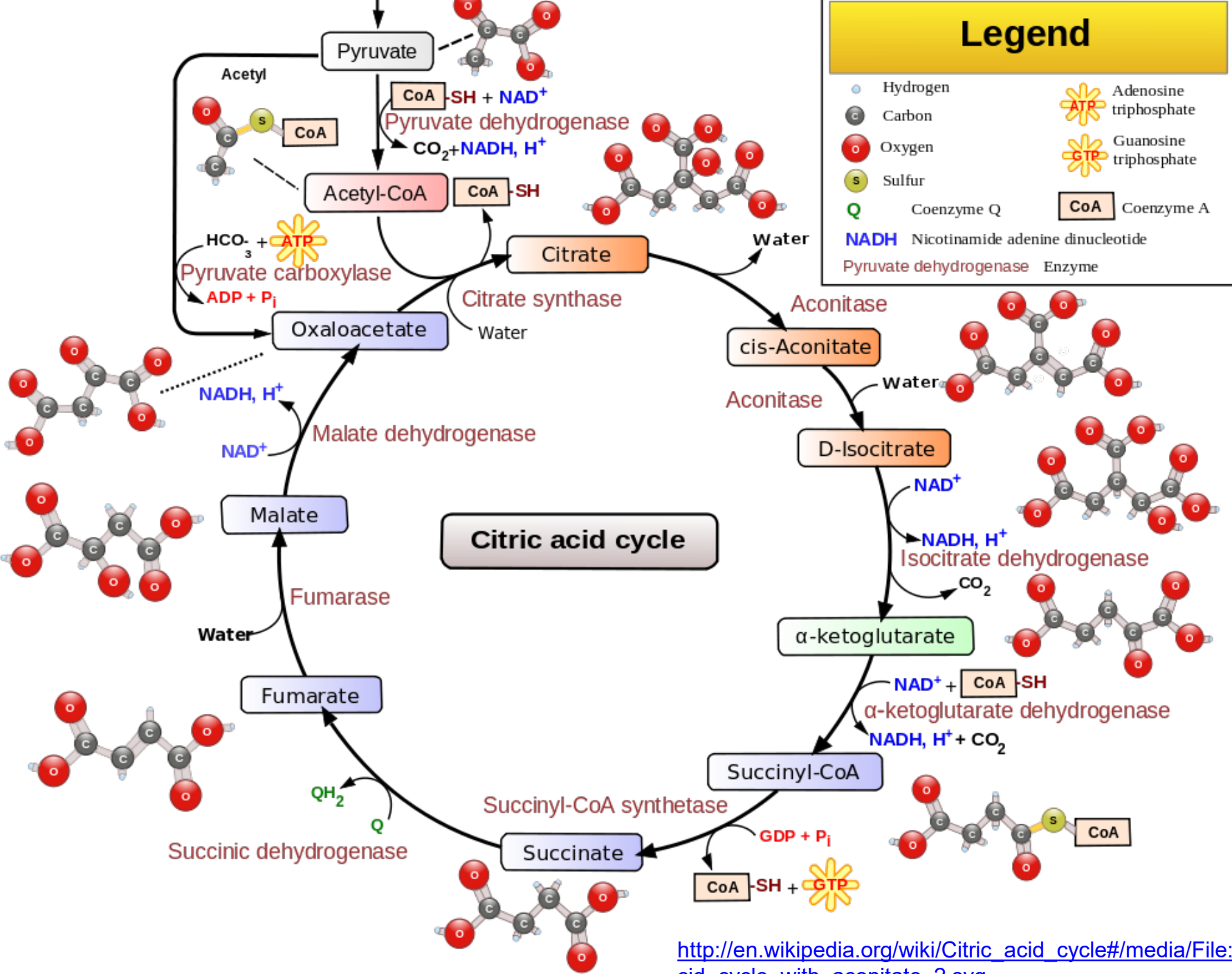
## 2.1.2. Μεταβατική αντίδραση



- Συνδέει τη γλυκόλυση με τον κύκλο του Krebs
- **Τελικά προϊόντα:**
  - 2 ακέτυλο-συνένζυμο A
  - 2 CO<sub>2</sub>
  - 2 NADH + 2 H<sup>+</sup>

## 2.1.3. Κύκλος του Krebs (κύκλος του κιτρικού οξέως)

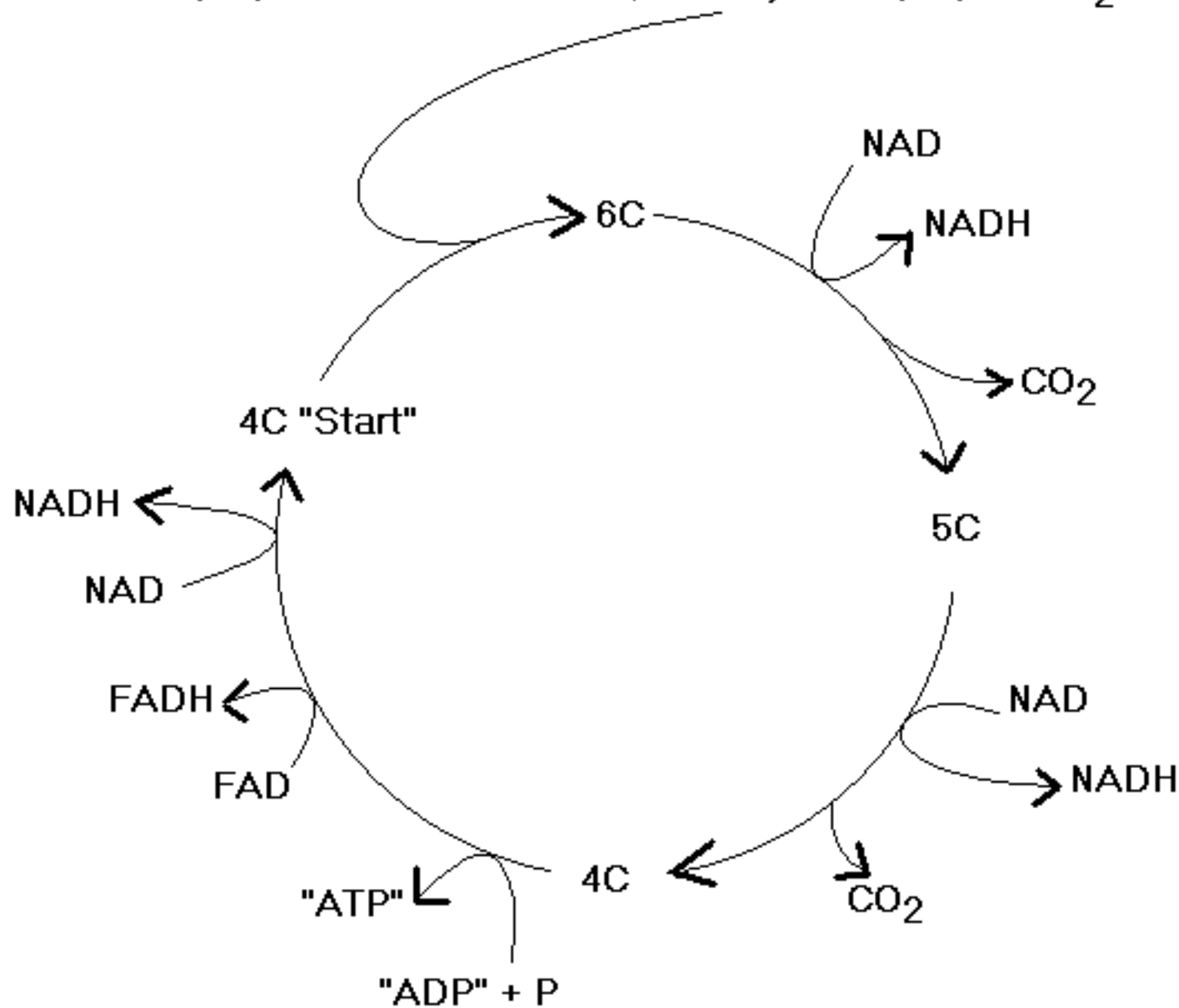
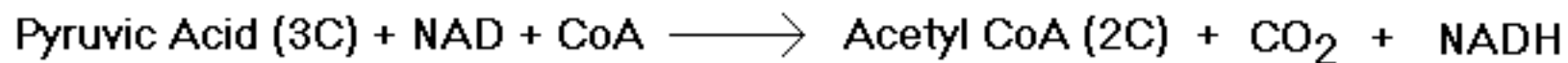
- Ακολουθία χημικών αντιδράσεων που αρχίζουν και τελειώνουν με το κιτρικό οξύ
- **Τελικά προϊόντα:**
  - 2 GTP
  - 6 NADH + 6 H<sup>+</sup>
  - 2 FADH + 2 H<sup>+</sup>
  - 4 CO<sub>2</sub>



[http://en.wikipedia.org/wiki/Citric\\_acid\\_cycle#/media/File:Citric\\_acid\\_cycle\\_with\\_aconitate\\_2.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/Citric_acid_cycle#/media/File:Citric_acid_cycle_with_aconitate_2.svg)



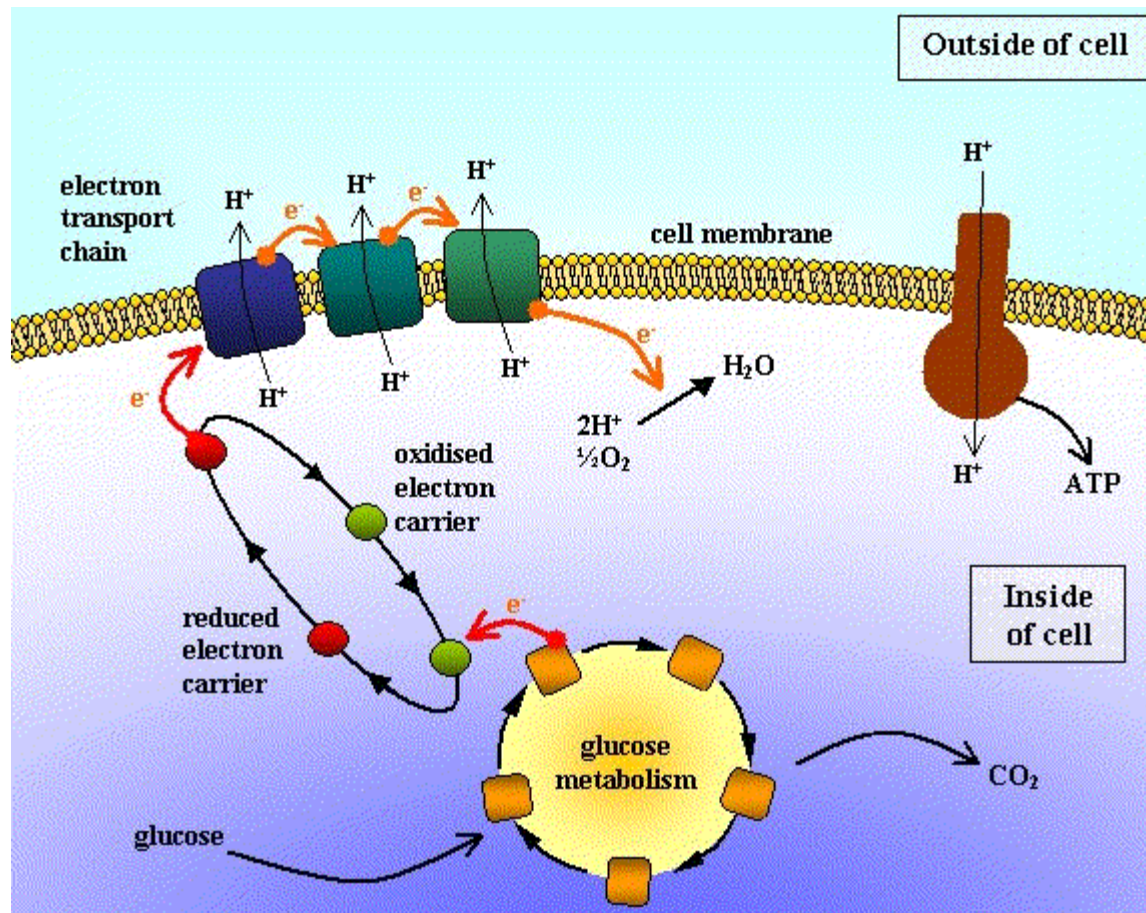
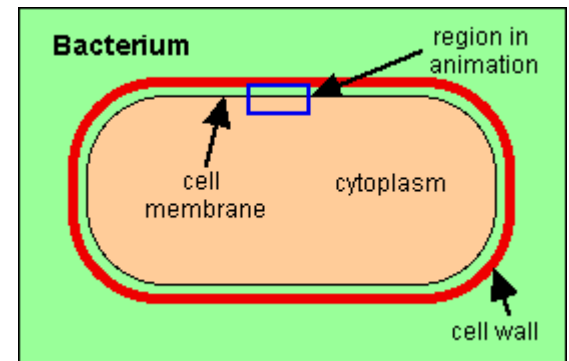
## Respiration: Preliminary Reactions and the Krebs Cycle

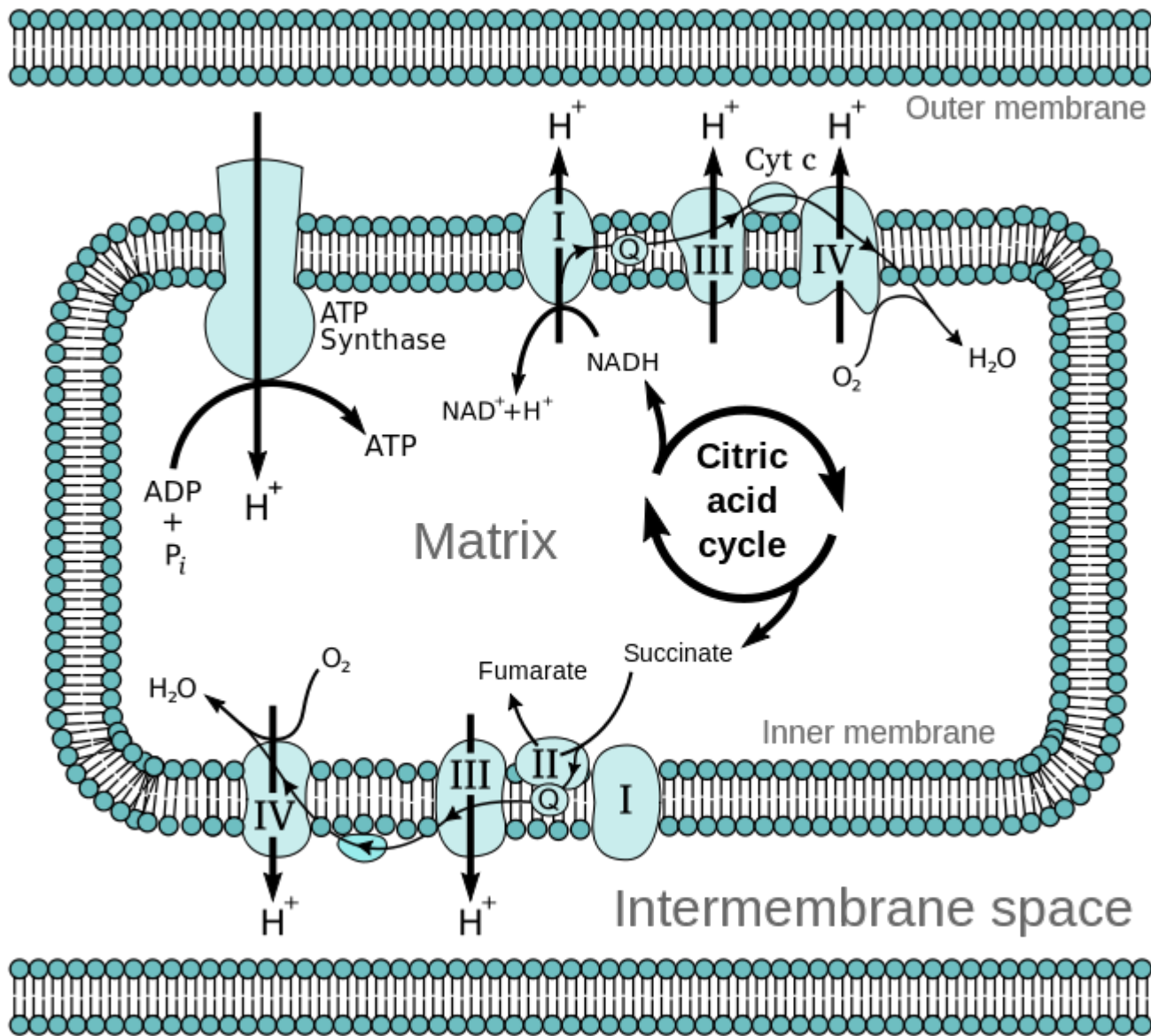


## 2.1.4. Αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων

- Συμβαίνει στα μιτοχόνδρια και την βακτηριακή μεμβράνη
- Βασίζεται στη **χημειώσωση**
  - **Τελικά προϊόντα:** 34 ATP

# Χημειώσωση στα βακτήρια





**Χημειώσωση στο μιτοχόνδριο**

Πως προκύπτουν τα 34 ATP από την αναπνευστική αλυσίδα;

3 ATP για κάθε  $\text{NADH} + \text{H}^+$

2 ATP για κάθε  $\text{FADH} + \text{H}^+$

**NADH + H<sup>+</sup>**

**FADH + H<sup>+</sup>**

- Γλυκόλυση 2
- Μετάβαση 2
- Κύκλος Krebs 6
- Σύνολο 10
- $10 \times 3 = 30 \text{ ATP}$

- Γλυκόλυση 0
- Μετάβαση 0
- Κύκλος Krebs 2
- Σύνολο 2
- $2 \times 2 = 4 \text{ ATP}$

# Συνολική παραγωγή ATP από την πλήρη οξείδωση ενός μορίου γλυκόζης στην αεροβική αναπνοή

	<b>ATP</b>
• Γλυκόλυση	2
• Μεταβατική αντίδραση	0
• Κύκλος Krebs	2
• Αναπνευστική αλυσίδα	34
• <b>Σύνολο</b>	<b>38</b>

## **2.2. Αεροβική κυτταρική αναπνοή**

### **Θέματα σχετικά με τη γλυκόλυση/καταβολισμό**

## **Άλλα θέματα σχετικά με τη γλυκόλυση/καταβολισμό**

1. Καταστολή από καταβολίτη (γλυκόζη)
2. Καταβολισμός άλλων σακχάρων, παραδείγματα
3. Άλλοι καταβολισμοί
4. Άλλοι αεροβικοί καταβολισμοί
5. Ζυμώσεις
6. Αναεροβική αναπνοή



## **2.2.1. Καταστολή από τον καταβολίτη**

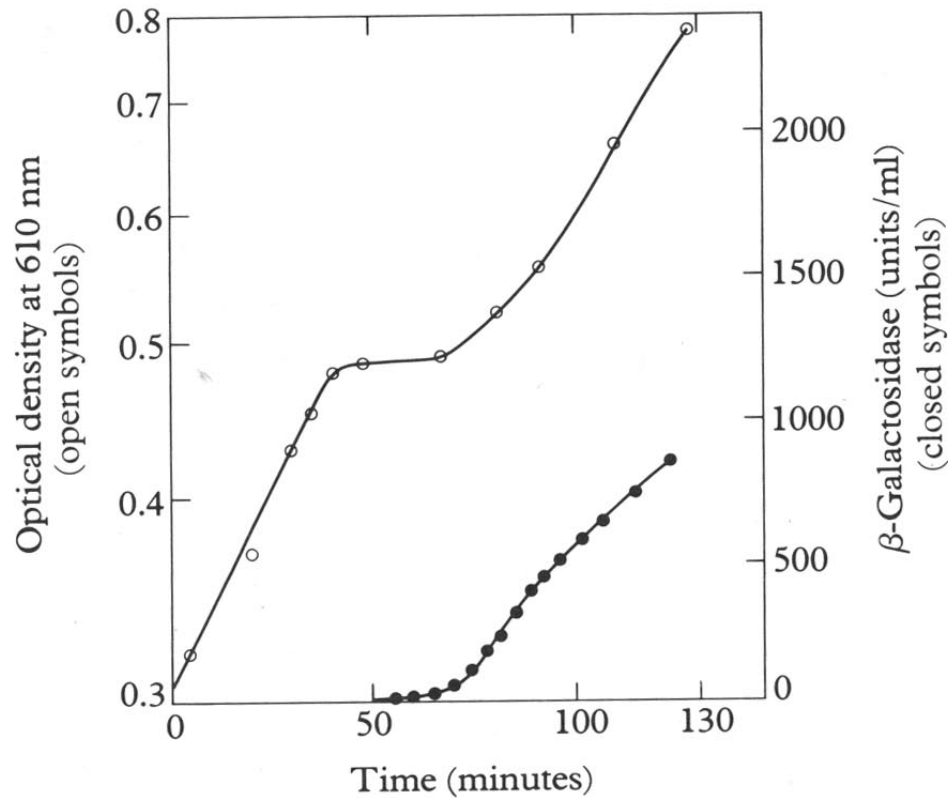
Οι ετερότροφοι οργανισμοί μπορούν να καταβολίζουν διαφορετικά σάκχαρα. Τα προϊόντα αποδόμησης εισάγονται στις γνωστές, προϋπάρχουσες καταβολικές οδούς. Όμως, για την έναρξη του καταβολισμού των, απαιτείται η βιοσύνθεση ενζύμων (κινάσες, ισομεράσες, αλδολάσες) και μεταφορέων (περμεάσες) που θα επιτρέψουν αυτό το μεταβολισμό.

Η γλυκόζη καταστέλλει την επαγωγή της σύνθεσης των ενζύμων και μεταφορέων για το μεταβολισμό εναλλακτικών σακχάρων.

### **Διφασική αυξητική πορεία ανάπτυξης ή διαύξηση**

Οι οργανισμοί πρώτα καταναλώνουν τη γλυκόζη και κατόπιν βιοσυνθέτουν τα ένζυμα που απαιτούνται για τον καταβολισμό άλλων σακχάρων.

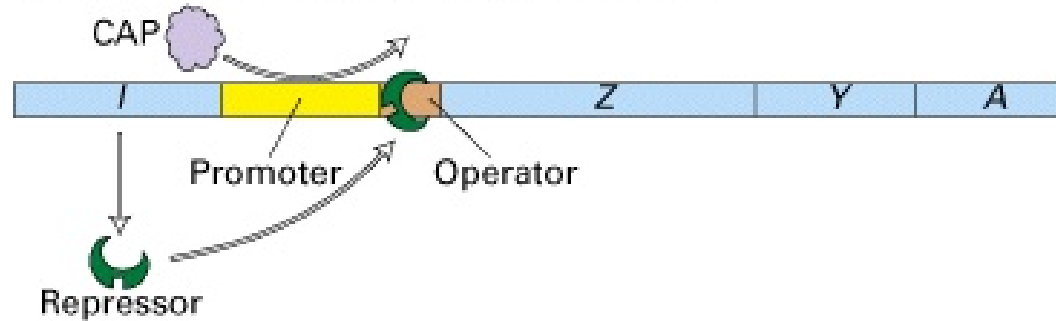
## 2.2.1. Καταστολή από τον καταβολίτη



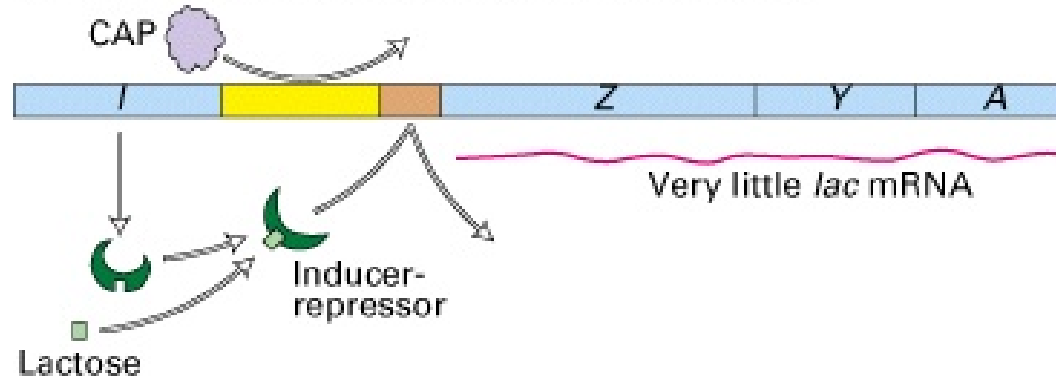
Delayed appearance of  $\beta$ -galactosidase in *E. coli* growing in a medium containing initially 0.4 mg/ml of glucose and 2 mg/ml of lactose. The left-hand ordinate indicates the cell density of the growing culture. [From W. Epstein, S. Naono, and F. Gros, *Biochem. Biophys. Res. Commun.* **24**, 588 (1966).]

# Ενεργοποίηση μεταγραφής από τον cAMP-CAP (Catabolite Activator Protein) στο σπερόνιο λακτόζης

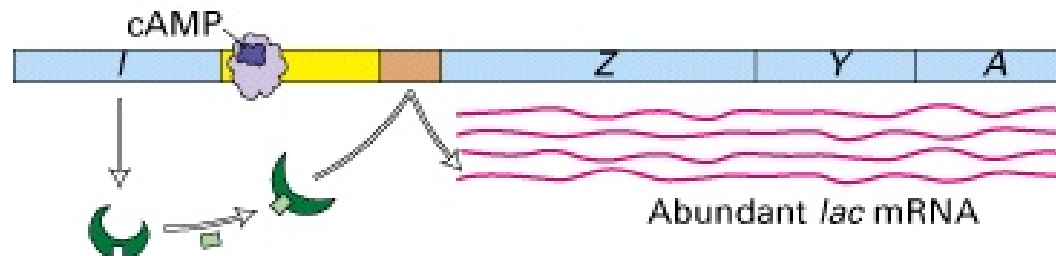
(a) Glucose present (cAMP low); no lactose



(b) Glucose present (cAMP low); lactose present



(c) No glucose present (cAMP high); lactose present



## 2.2.2. Καταβολισμός άλλων σακχάρων, παραδείγματα :

**Γαλακτόζη** → D-γαλακτόζη (→ 6-P-φρουκτόζη) και D-γλυκόζη

**Μαλτόζη** → γλυκόζη (→ 6-P-γλυκόζη)

**Μαννιτόλη** → 6-P-φρουκτόζη

**Φουκόζη και Ραμνόζη** → P-διυδροξύ ακετόνη και γαλακτική αλδεΐδη

**Πηκτίνη:** με μεθυλεστεράση → πολυγαλακτουρονικό οξύ

πολυγαλακτουρονικό οξύ + λυάση της πηκτίνης → ακόρεστο διγαλακτουρονικό οξύ

πολυγαλακτουρονικό οξύ + πολυγαλακτουρονάση → κορεσμένο ολιγογαλακτουρονικό

→ 2-κέτο, 3-διόξυ, 6-P-γλυκονικό → πυροσταφυλικό

**Κυτταρίνη:** + ένδο και έξω  $\beta$ -1,4 γλυκανάσες → κελλοβιόζη

Κελλοβιόζη +  $\beta$ -γλυκοζιδάση → γλυκόζη

Μύκητες, συμβιοτικά βακτήρια μυρηκαστικών, λίγα θετικά κατά Gram αναερόβια

*Sporocytophaga* και *Cytophaga* (κυτταρινόσωμα).

**Άμυλο:**  $\alpha$ -αμυλάση →  $\alpha$ -γλυκόζη +  $\alpha$ -μαλτόζη

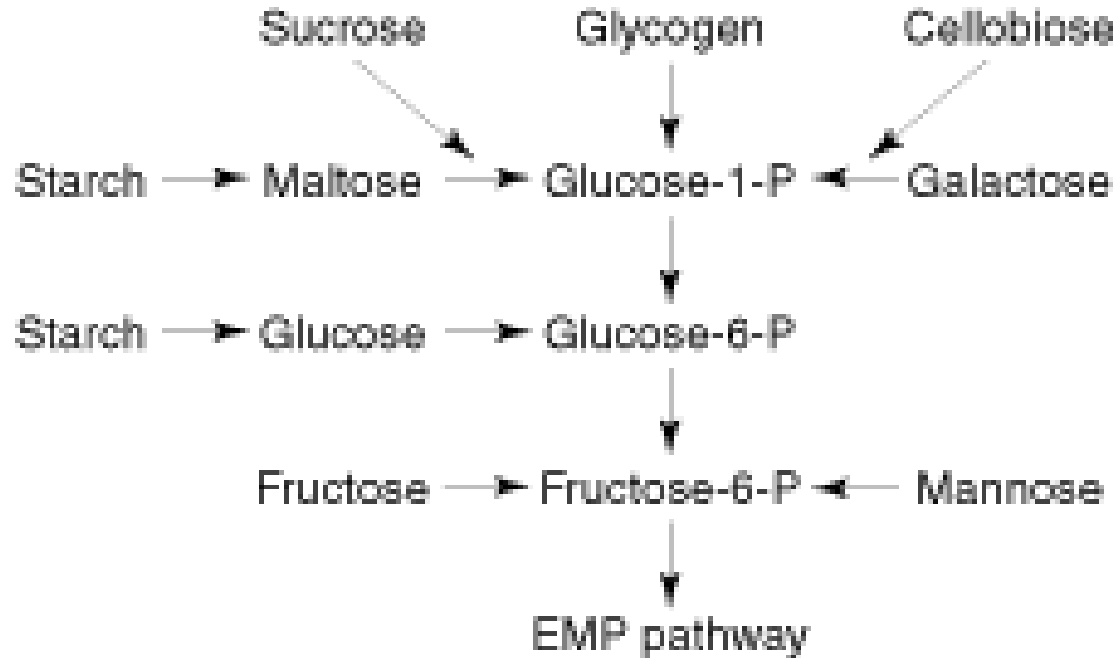
$\beta$ -αμυλάση →  $\beta$ -μαλτόζη

**Άμυλοπηκτίνη, γλυκογόνο** → γλυκόζη, μαλτόζη, δεξτρίνη ( $\alpha$ -1,6-γλυκοζιδάση).

**Πουλλουάνη** (μαλτοτριόζες με  $\alpha$ -1,6): πουλλουανάσες (γλυκοαμυλάσες → γλυκόζη, τύπου I → μαλτοτριόζη, ισο-πουλλουανάσες,  $\alpha$ -γλυκοζιδάσες).

**Κυκλοδεξτρίνη:** κυκλοδεξτρινάσες (*Bacillus*).

## Περίληψη καταβολισμού άλλων σακχάρων



Formation of intermediates of the Embden–Meyerhof–Parnas (EMP) and Entner–Doudoroff (ED) pathway from carbohydrates other than glucose

# Παραδείγματα

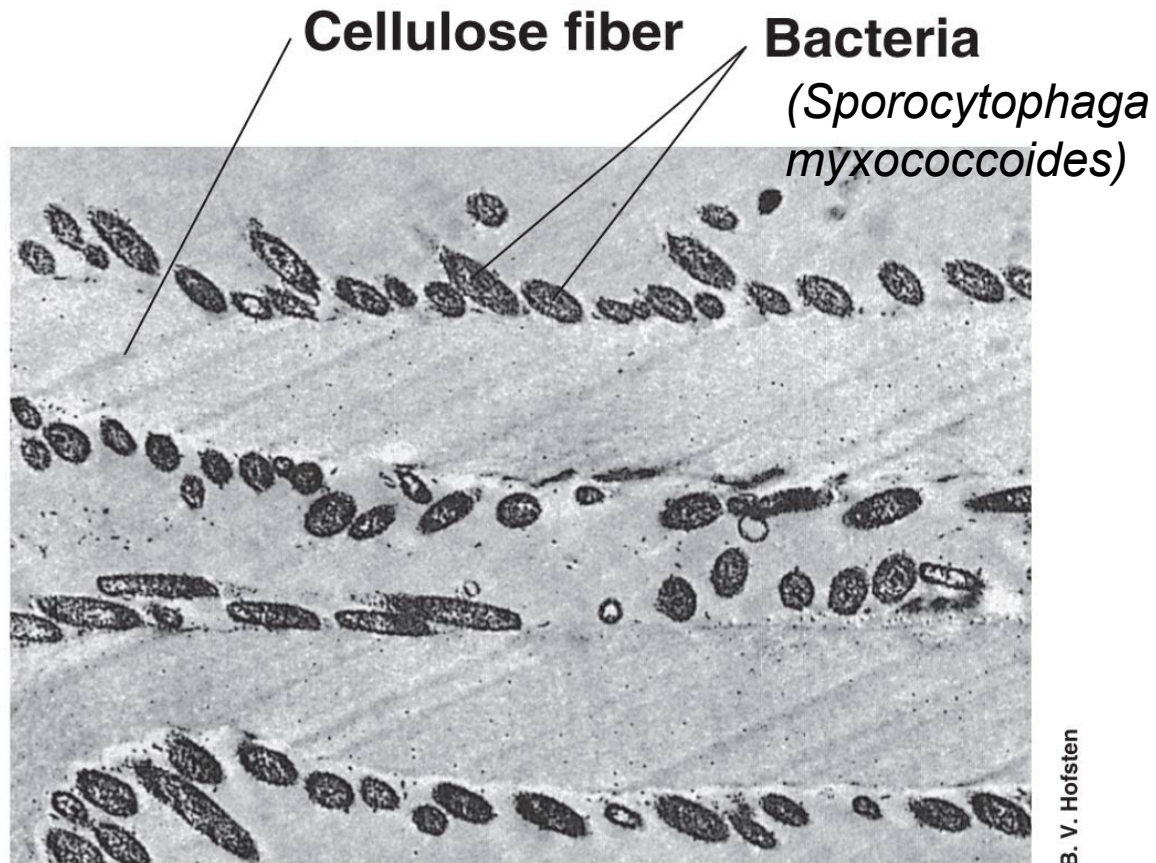
Αποδόμηση αμύλου από *Bacillus subtilis* που περιέχει αμυλάσες



Πορφυρό μαύρο  
χρώμα από το  
σύμπλεγμα αμύλου-  
ιωδίου

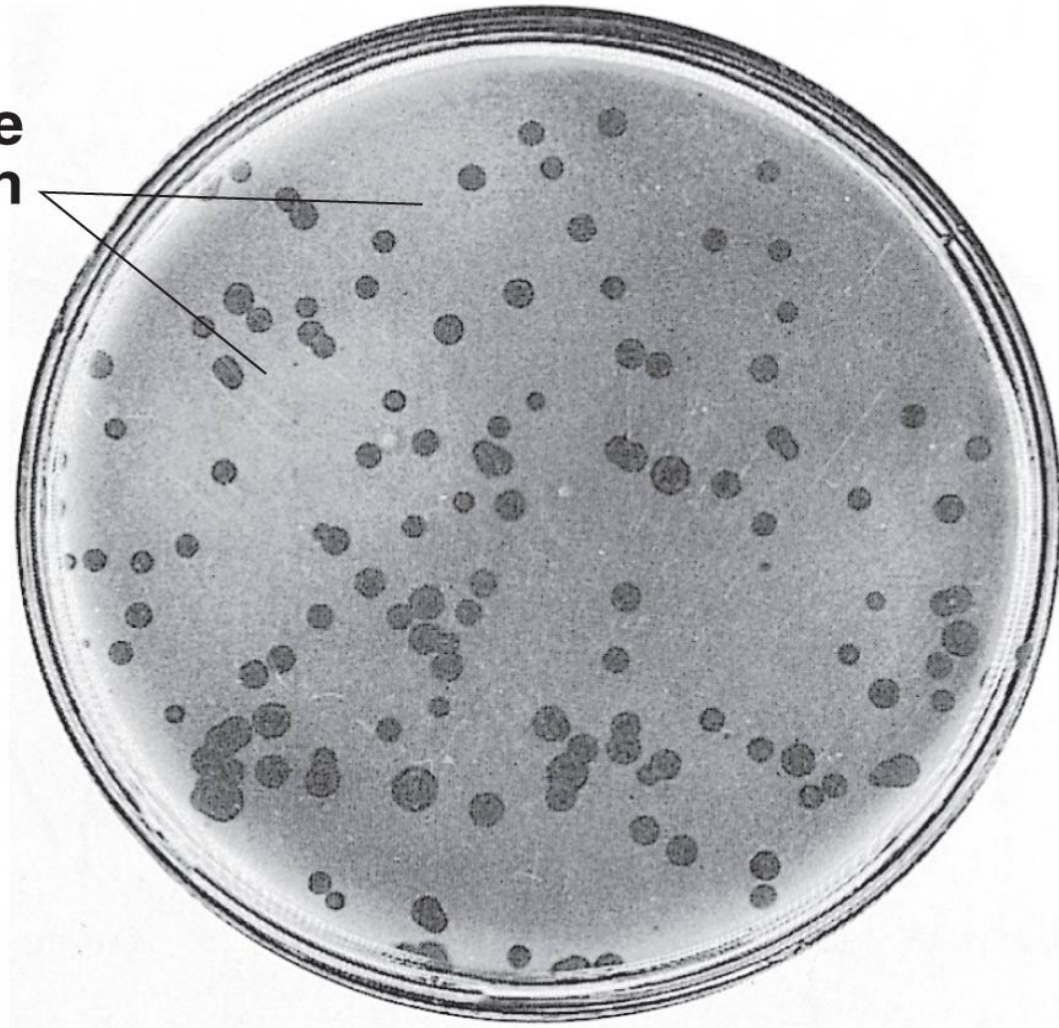
# Παραδείγματα

## Αποδόμηση κυτταρίνης



B. V. Hofsten

Cellulose  
digestion



Katherine M. Brock

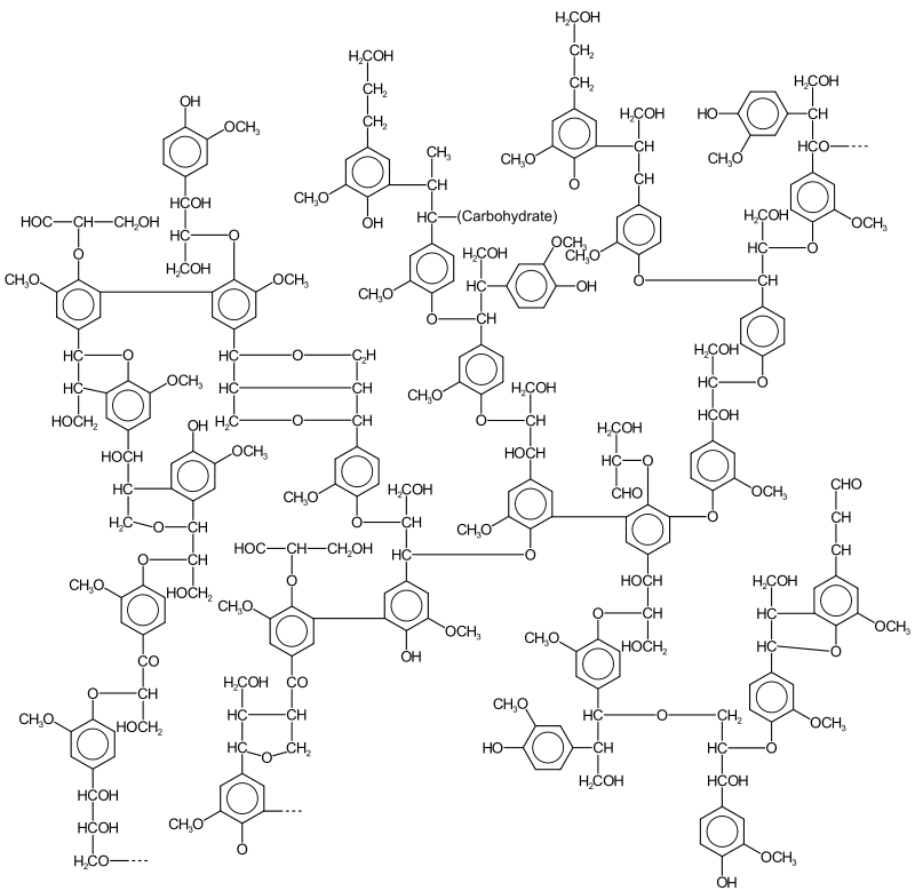
Παραδείγματα

Αποικίες *Cytophaga hutchinsonii* σε τρυβλίο αγαρόζης-κυτταρίνης

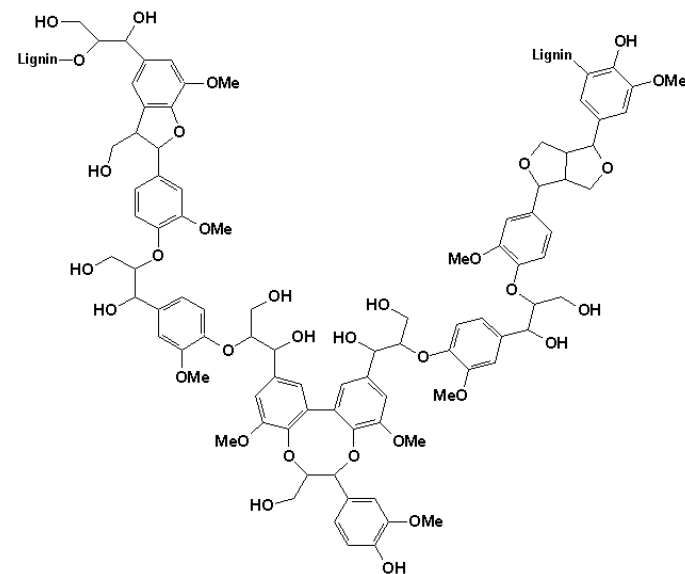


## 2.2.3. Άλλοι καταβολισμοί

**Αρωματικά συστατικά (πχ λιγνίνη):** εξειδικευμένοι μικροοργανισμοί και μύκητες



Τμήμα πολυμερούς λιγνίνης



By real name: Karol Głębki.wiki: Karol007commons: Karol007e-mail: kamikaze007 (at) tlen.pl - own work from: Glazer, A. W., and Nikaido, H. (1995). Microbial Biotechnology: fundamentals of applied microbiology. San Francisco: W. H. Freeman, p. 340. ISBN 0-71672608-4 This vector image was created with Inkscape., CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1993633>

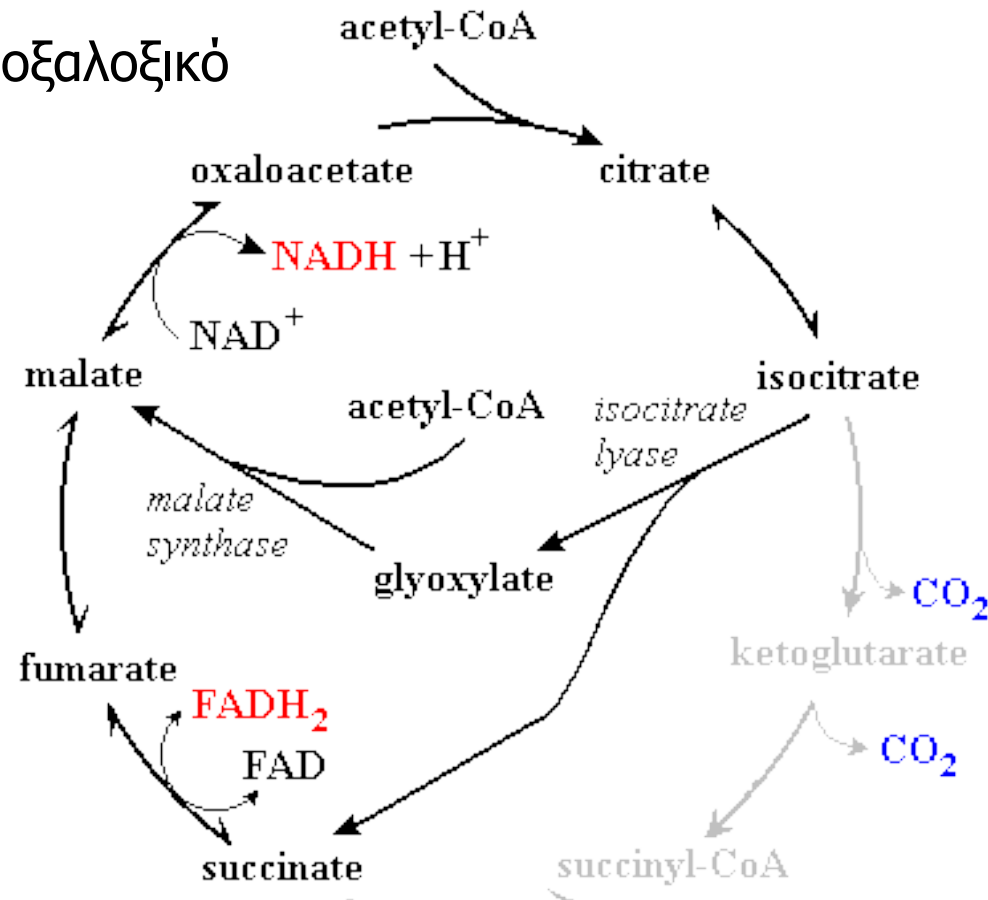
## 2.2.4. Άλλοι αεροβικοί καταβολισμοί

**2.2.4.1 Κύκλος του γλυοξυλικού:** Χρήση απλών υποστρωμάτων όταν απουσιάζει η γλυκόζη σε βακτήρια-φυτά. Χρησιμοποιείται το οξικό οξύ για την κατασκευή δύο δικαρβοξυλικών οξέων με αλυσίδα 4 ατόμων άνθρακα. Οι δύο οξειδωτικές αποκαρβοξυλιώσεις του κύκλου TCA παρακάμπτονται και μετατρέπεται το ισοκίτρικό σε μηλικό (και οξαλοξικό) και ηλεκτρικό.

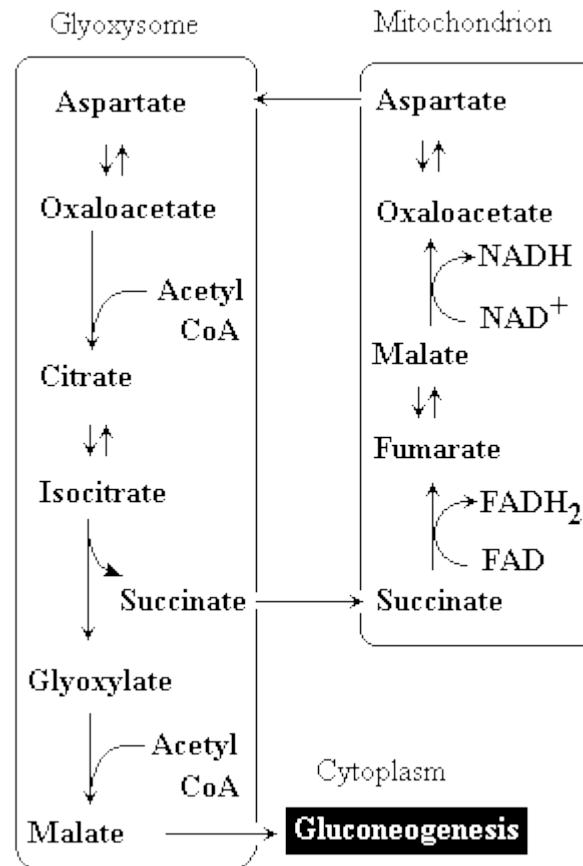
**Υποστρώματα C<sub>2</sub>:** C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH → CH<sub>3</sub>CHO → ακέτυλο-CoA

ακέτυλο-CoA + γλυοξυλικό → μηλικό, οξαλοξικό

Υποβοηθάται η **σύνθεση κίτρικού** από υποστρώματα 2C, αλλά και η παραγωγή γλυκόζης από το μηλικό



# Στα φυτά:



The enzymes of the TCA cycle and the glyoxylate cycle are physically segregated, and glyoxylate cycle enzymes are localized in a specialized organelle called the **glyoxysome**. The glyoxysome **lacks means for reoxidizing NADH**, so has none of the dehydrogenases. Glyoxysomes import **fatty acids** and **aspartate**. Fatty acids provide the source of acetyl CoA.

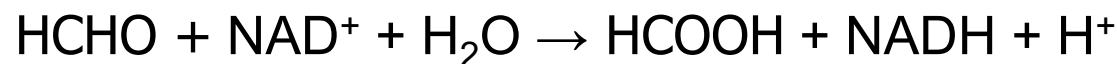
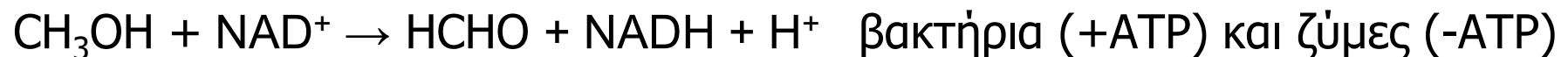
## 2.2.5. Αεροβικός καταβολισμός CH<sub>4</sub> και CH<sub>3</sub>OH

**Μεθυλότροφοι** είναι οι οργανισμοί που χρησιμοποιούν ενώσεις που στερούνται C-C δεσμούς ως δότες ηλεκτρονίων και πηγή C.

**Μεθανότροφοι** είναι οι μεθυλότροφοι οργανισμοί που χρησιμοποιούν CH<sub>4</sub>

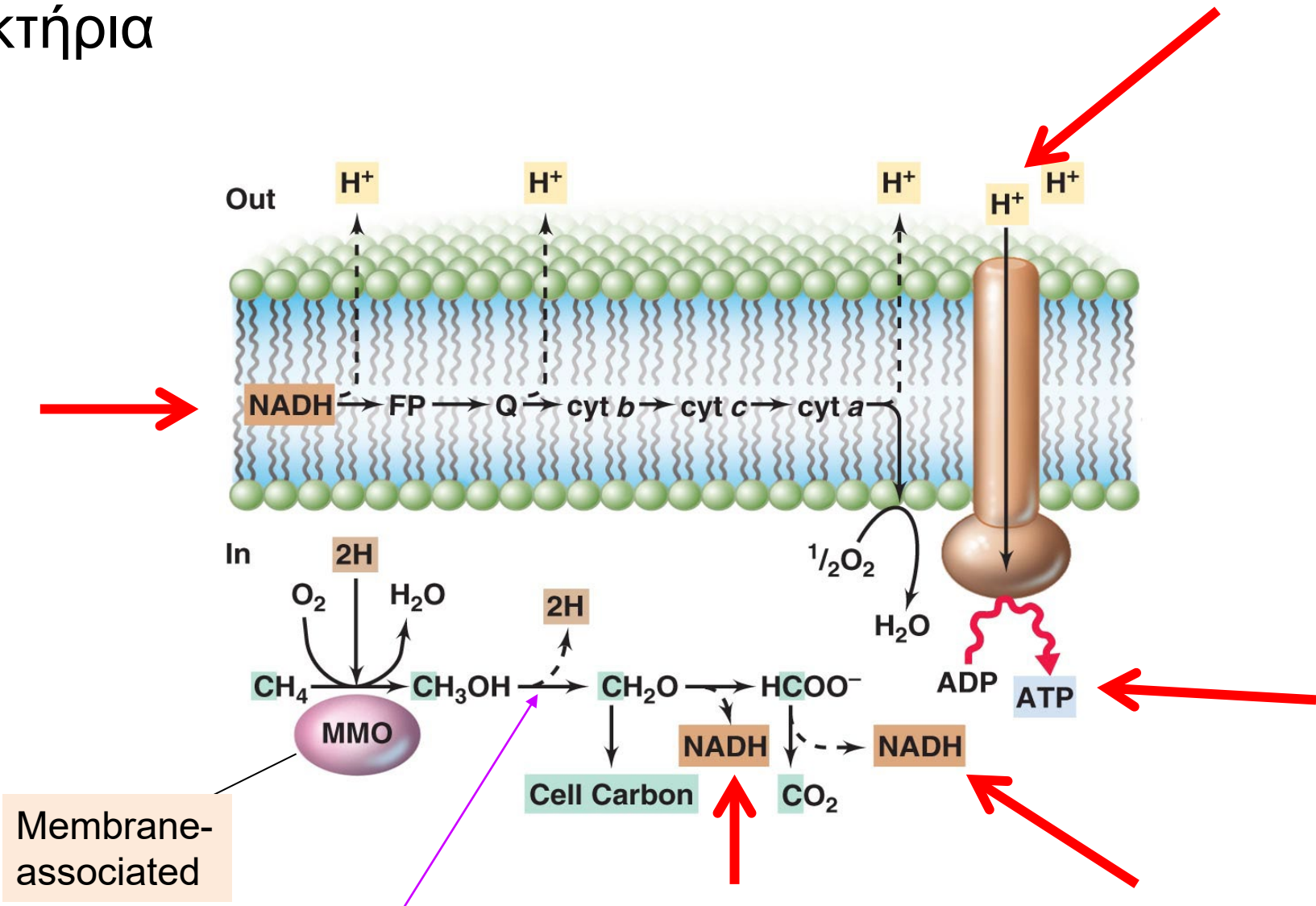
Το πρώτο βήμα στη μεθανοτροφία απαιτεί την **μονοοξυγονάση του μεθανίου** (MMO)

- υπάρχει διαλυτή **MMO** (sMMO)
- και δεσμευμένη σε μεμβράνες (pMMO).



Το NADH δίνει ηλεκτρόνια στην αναπνευστική αλυσίδα.

# Οξείδωση του CH<sub>4</sub> σε CO<sub>2</sub> από τα μεθανοτροπικά βακτήρια



Membrane-associated

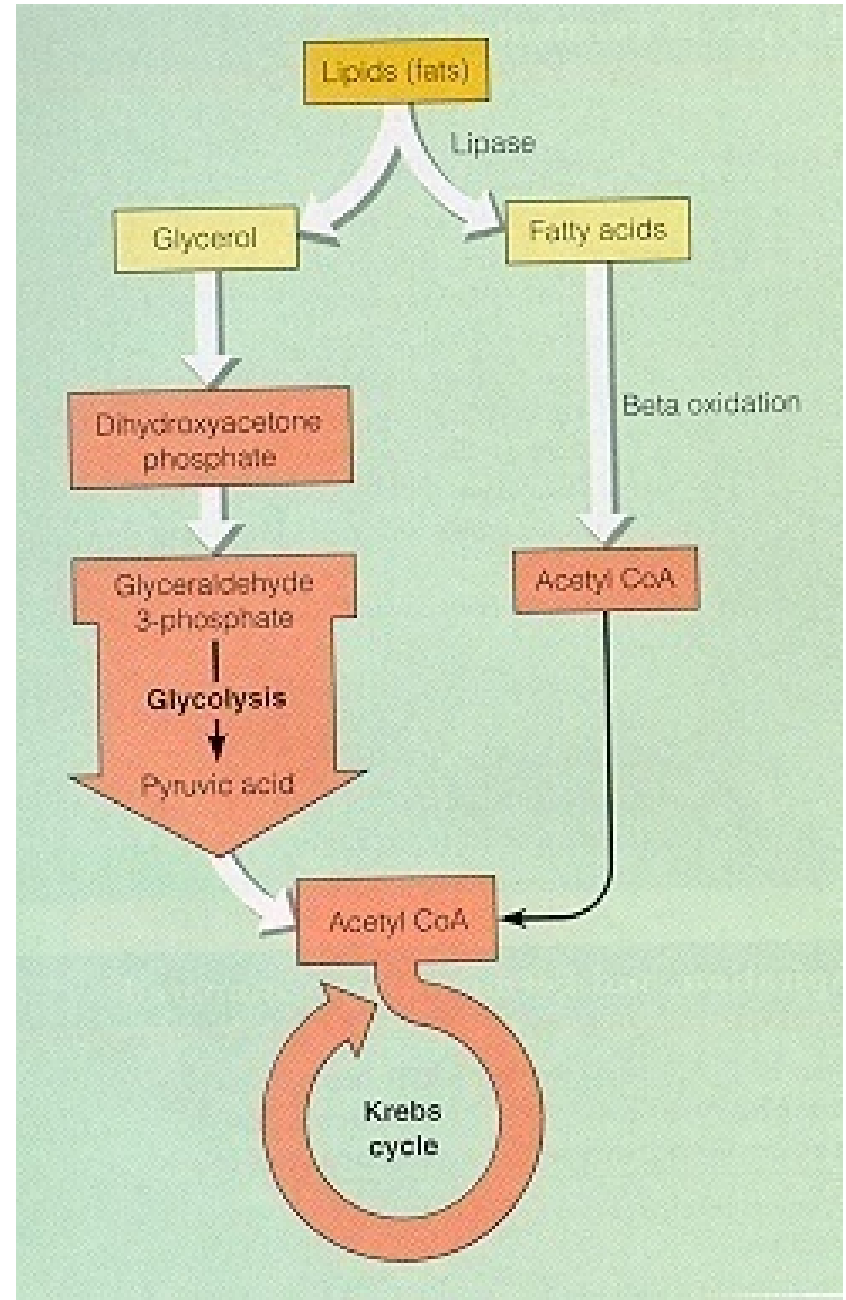
Αφυδρογονάση της μεθανόλης

ΤΕΛΟΣ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ

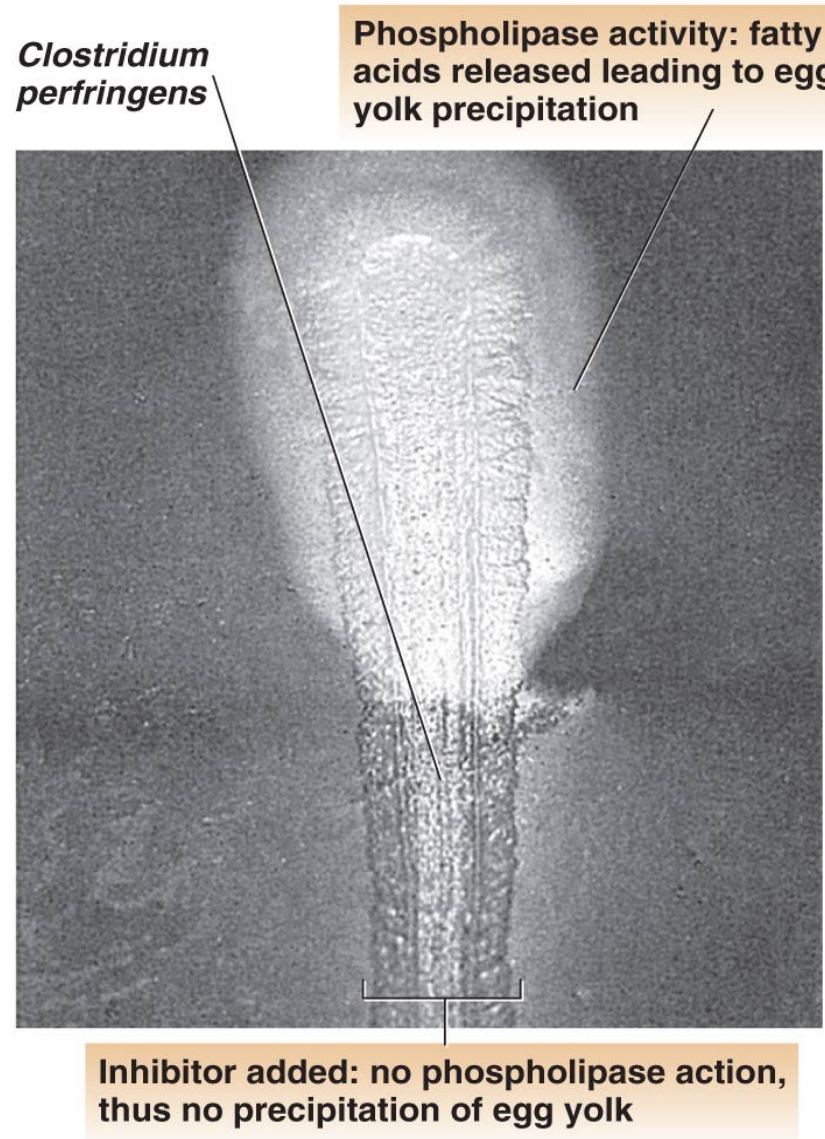
## 2.3 Καταβολισμός λιπαρών οξέων

**Λιπίδια:** άφθονα στη φύση, αποδομούνται από πολλούς μικροοργανισμούς.

Ο καταβολισμός τους αρχίζει με υδρόλυση του εστερικού δεσμού από εξωκυτταρικές **λιπάσες**. Προκύπτουν λιπαρά οξέα και γλυκερόλη από την υδρόλυση των τριγλυκεριδίων.

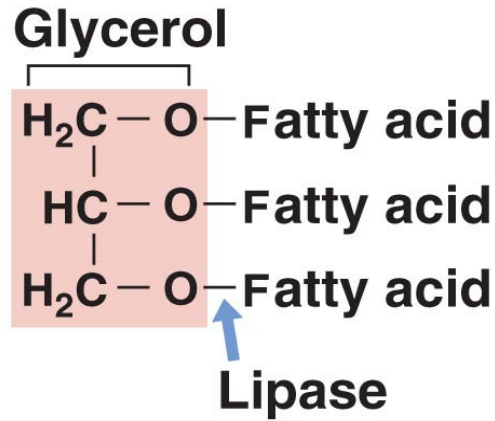


# Ενεργότητα φωσφολιπάσης από κλωστρίδια σε κρόκκο αυγού

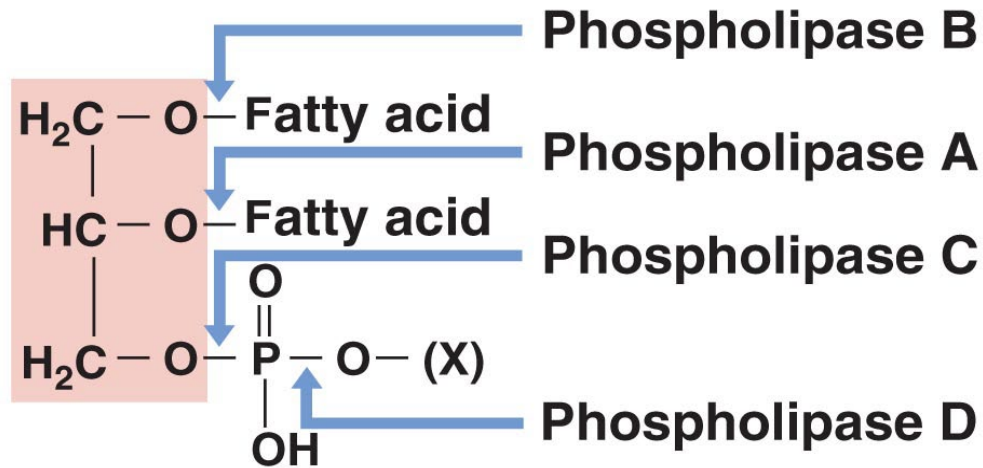




# Λιπάσες



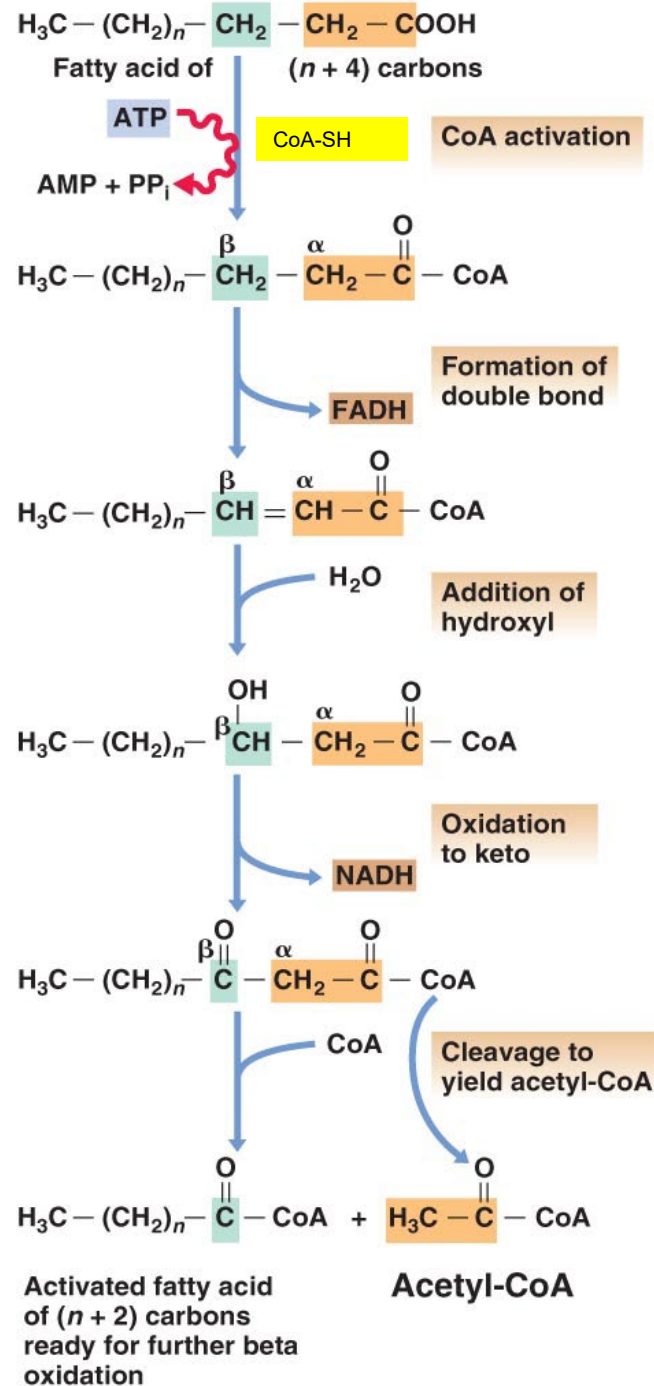
(a)



(b)

- Τα **λιπαρά οξέα** οξειδώνονται από τη **βήτα οξείδωση**
  - Σειρά αντιδράσεων στις οποίες οι συμμετέχουσες ουσίες ενεργοποιούνται αρχικά από το συνένζυμο A
  - 1 άνθρακες από το συμμετέχον λιπαρό οξύ απομακρύνονται διαδοχικά δίνοντας **ακετύλ-CoA**
- Το προκύπτον **ακετύλ-CoA** καταβολίζεται μέσω του κύκλου του κιτρικού

# Βήτα οξείδωση



Θεωρητικά 17, στην πράξη 14  
ATP ανά κύκλο

Το σύνολο των ATP που παράγονται ισούται με αυτά που παρήχθησαν μείον αυτά που καταναλώθηκαν

**Στον κύκλο του κιτρικού**

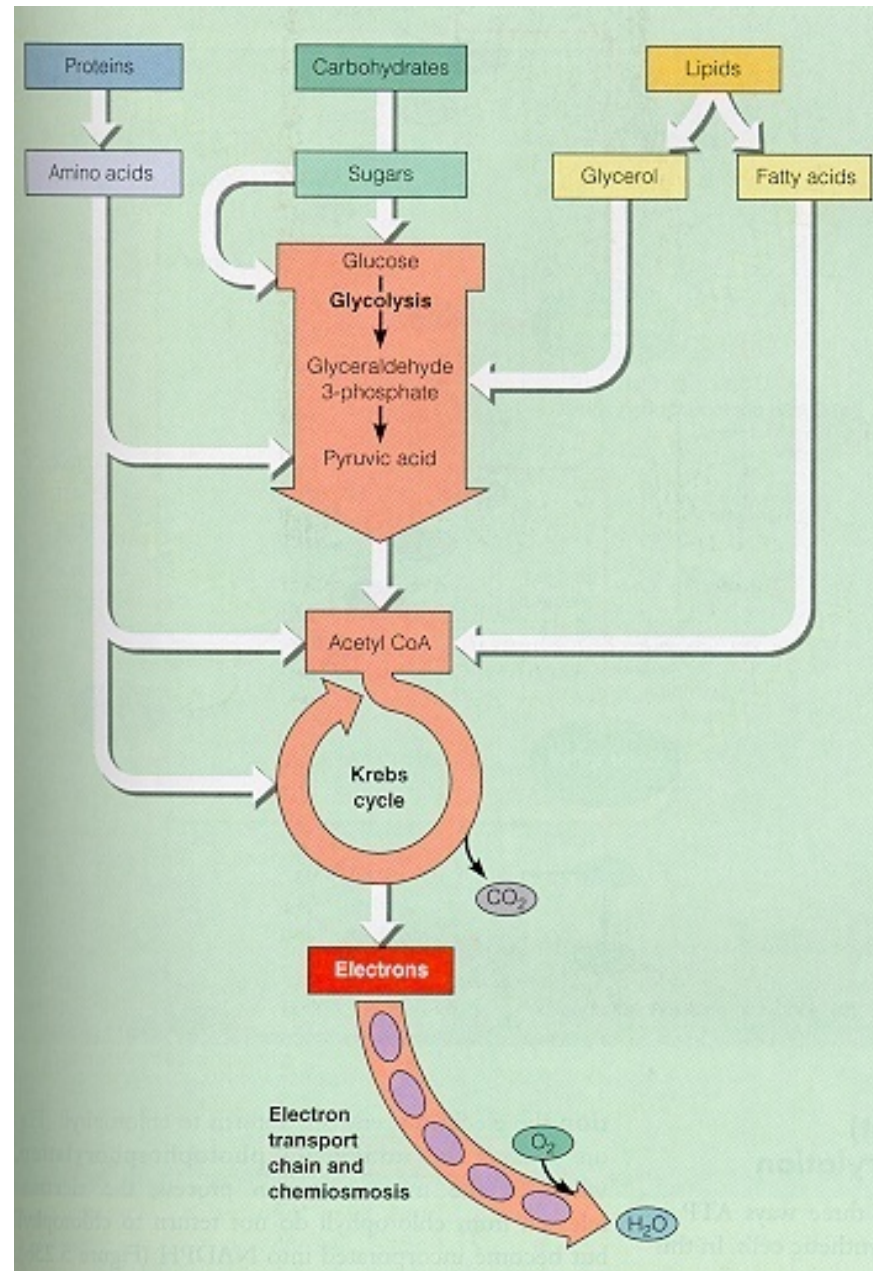
1 FADH <sub>2</sub> παράγει	2 ATP	στην πράξη 1,5
1 NADH παράγει	3 ATP	στην πράξη 2,5
1 Ακέτυλο συνένζυμο Α παράγει	12 ATP	στην πράξη 10
Σύνολο	17	14

**Για ένα κορεσμένο λιπαρό οξύ με άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα C<sub>2n</sub>**

$$(n - 1) * 14 + 10 \text{ (ακέτυλο CoA)} - 2 \text{ (για ενεργοποίηση)} = \text{συνολικά ATP}$$

Για n = 8 (παλμιτικό 16 άνθρακες), τα συνολικά ATP είναι 106

## 2.4. Καταβολισμός πρωτεϊνών



## 2.5. Ζυμώσεις (κυρίως από γλυκόζη)

- Οι οργανικές ενώσεις των εμβίων καταβολίζονται με δύο διαδικασίες:
  - Αναπνοή
    - Τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται σε **εξωγενείς** αποδέκτες
      - Αεροβική και αναεροβική
  - Ζύμωση
    - Ο δότης και αποδέκτης ηλεκτρονίων είναι η **ίδια ένωση** ( $\text{NADH} \rightleftharpoons \text{NAD}^+$ ). Σχετικά μικρή απόδοση ενέργειας.

# Ζυμώσεις (κυρίως από γλυκόζη)

## Ορισμός:

Ανεξάρτητη από το  $O_2$  κυτταροπλασματική διαδικασία οξειδωσης, που περιλαμβάνει συνήθως την κλασσική γλυκόλυση (αναγωγή **NAD<sup>+</sup>** σε **NADH** και προϊόν πυροσταφυλικό), η οποία δεν συνεχίζει με την αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων στο  $O_2$ , αλλά με ένα **επιπρόσθετο αναεροβικό στάδιο** που καταλήγει στην ατελή αναγωγή του προϊόντος γλυκόλυσης και οξειδωση του ανηγμένου **NADH** σε **NAD<sup>+</sup>** ούτως ώστε να διασφαλίζεται η συνέχεια της γλυκόλυσης.

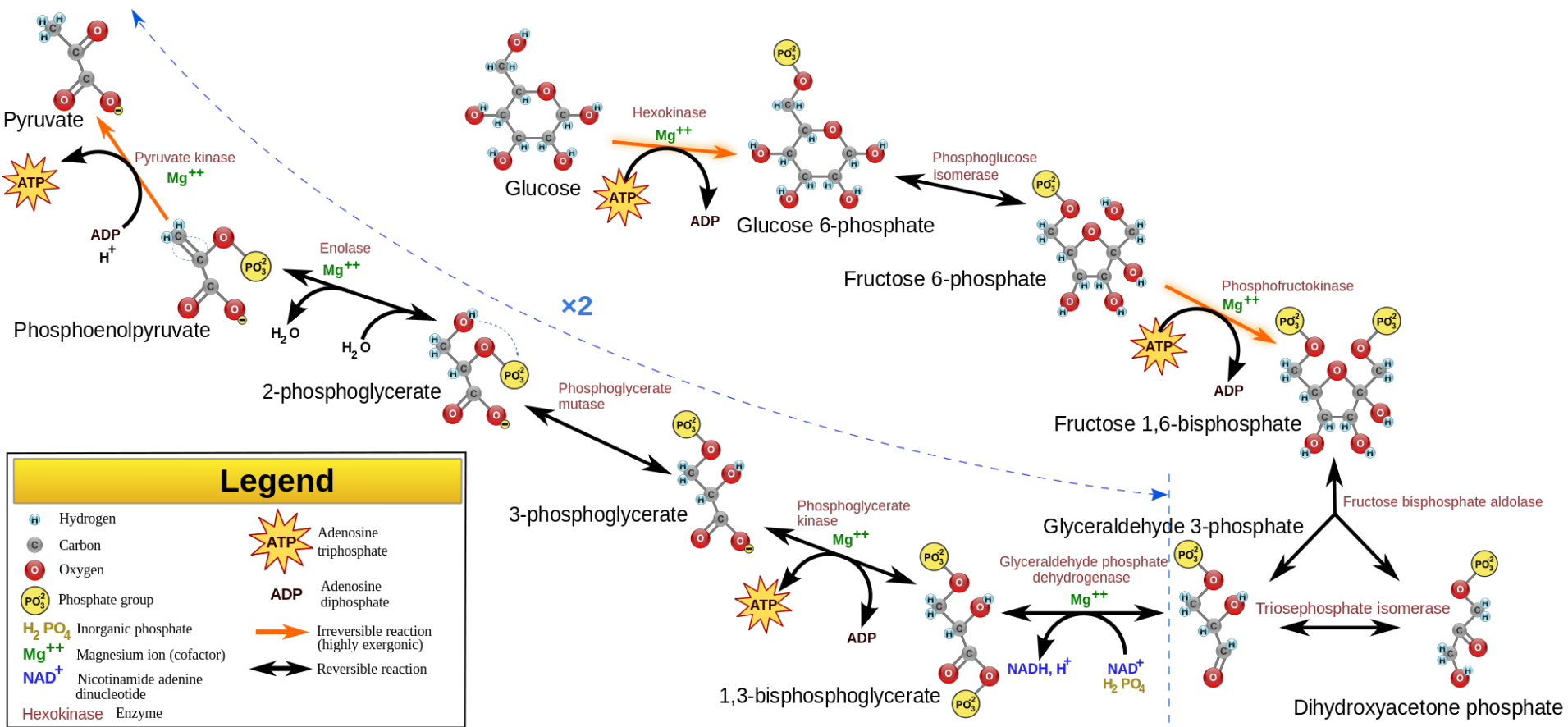
Οπότε: **οι ζυμώσεις επιτρέπουν τη συνέχιση της γλυκόλυσης και την συνεχή παραγωγή ATP από τη γλυκόλυση.** Τα υποπροϊόντα της ζύμωσης (αέρια, αλκοόλες, οξέα) αποβάλλονται στον περιβάλλοντα χώρο.

Σημειωτέον: η ζύμωση **δεν** είναι τύπος αναεροβικής αναπνοής. Οι ζυμώσεις γίνονται ανεξαρτήτως της παρουσίας οξυγόνου.



# Καταβολισμός: οξείδωση ουσιών (πχ σακχάρων) για παραγωγή ενέργειας

## 1. Καταβολική οδός Embden-Meyerhof-Parnas (EMP) ΓΛΥΚΟΛΥΣΗ



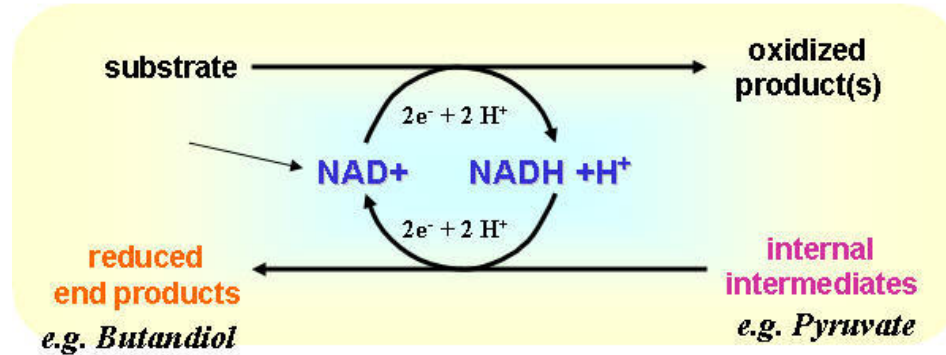
# Χαρακτηριστικά των ζυμώσεων από σάκχαρα

1. Από τη γλυκόλυση παράγονται αρχικά 2 ATP και πυροσταφυλικό οξύ μέσω φωσφορυλίωσης σε επίπεδο υποστρώματος. Στη διαδικασία **ανάγεται το  $NAD^+$  σε  $NADH$** .
2. Το πυροσταφυλικό οξύ (από τη γλυκόλυση), ανάγεται σε ανηγμένα οργανικά **οξέα** ή **αλκοόλες** από το  **$NADH$**  που **οξειδώνεται** σε  **$NAD^+$** . Εξασφαλίζεται έτσι η συνεχής παροχή  **$NAD^+$**  που είναι απαραίτητη για τη συνέχιση της γλυκόλυσης.
3. Τελικά προϊόντα (εκκρίνονται):
  - Οξέα: γαλακτικό, οξικό, βουτυρικό, ακετόνη
  - Αλκοόλες: αιθανόλη, ισοπροπυλική αλκοόλη
  - Αέρια:  $CO_2$ ,  $H_2$
  - Προσμίξεις
  - Έξτρα ATP από δευτερογενή ζύμωση (παρ. 5.7):
    - οξικό (2), προπιονικό (2), βουτυρικό (2), βουτανόλη (4)

# Διαφορά ζύμωσης και αναπνοής

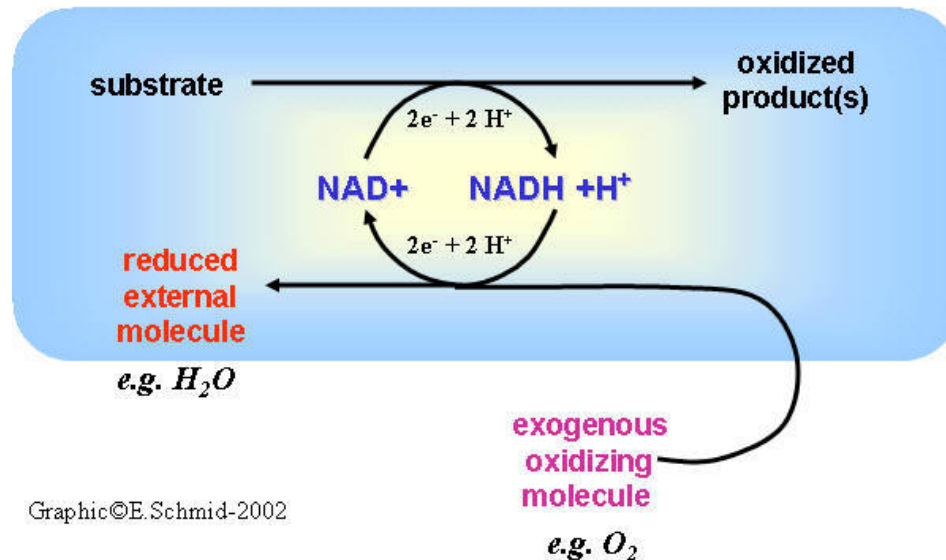
## Fermentation:

- organic substrates, e.g. glucose, are metabolized **without** the involvement of an exogenous (external) oxidizing molecule, e.g.  $O_2$
- fermentation is typically (but not necessarily) anaerob



## Respiration:

- organic substrates, e.g. glucose, are metabolized **with** the involvement of an **exogenous (external) oxidizing molecule**



# Η ζύμωση μπορεί να δώσει διαφορετικά τελικά προϊόντα

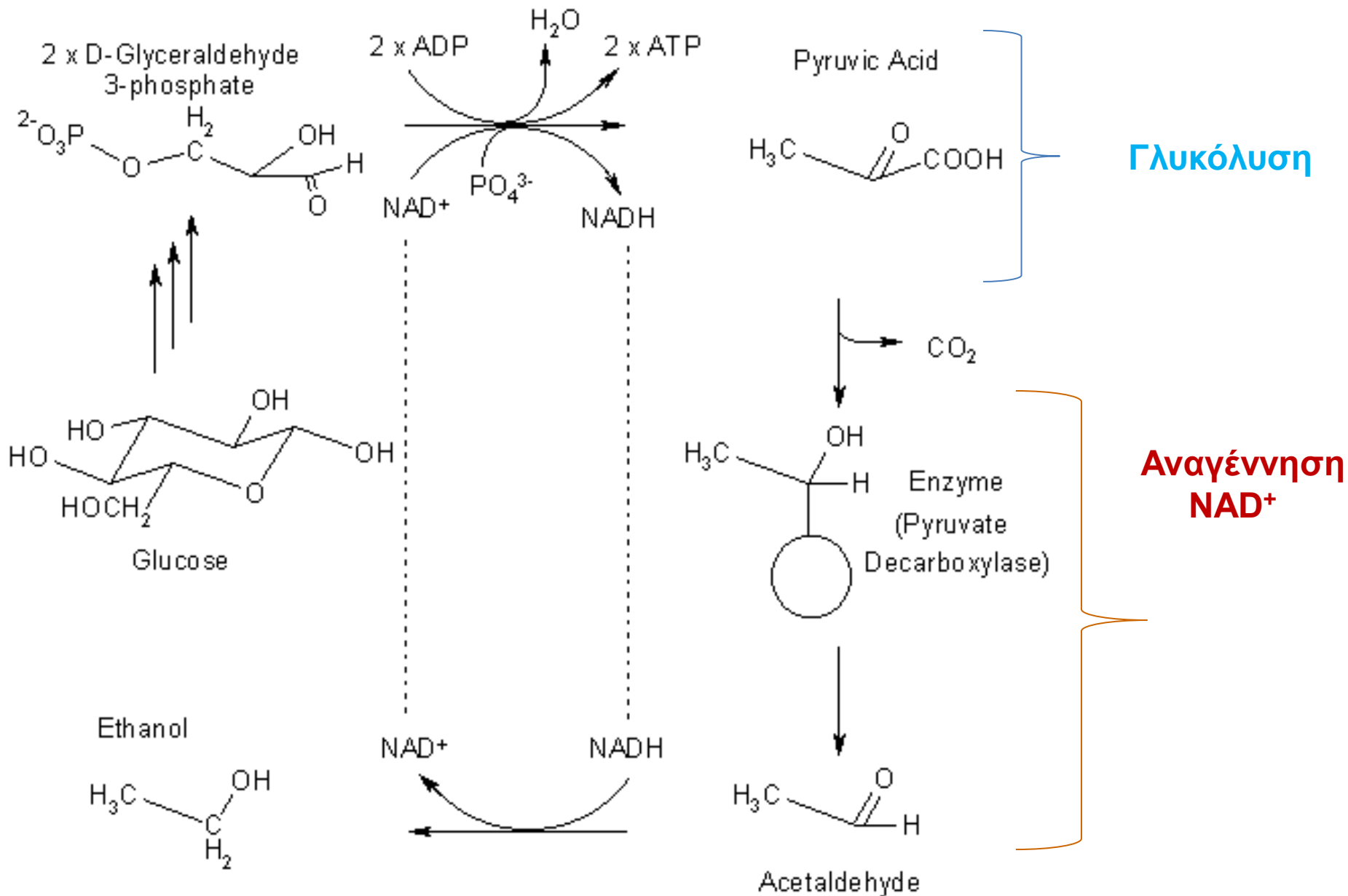


1. Τύπος του οργανισμού
2. Αρχικό υπόστρωμα
3. Συμμετέχοντα ένζυμα

## 2.5.1. Αλκοολική ζύμωση

- Παράγονται 2 ATP
- Τελικό προϊόντα: αιθανόλη και CO<sub>2</sub>
- Χρησιμοποιείται στην παραγωγή τροφίμων
  - Αλκοολούχα ποτά - Γλεύκος, αμυλούχα διαλύματα
  - Ψωμί - Άμυλο
- *Saccharomyces cerevisiae* (ζύμη)

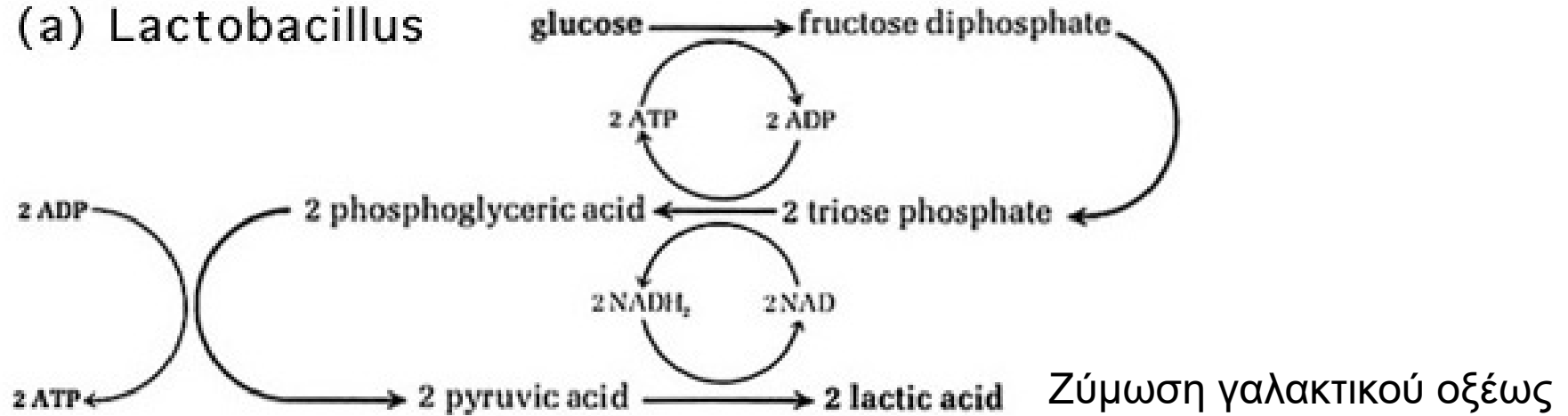
# Αλκοολική ζύμωση



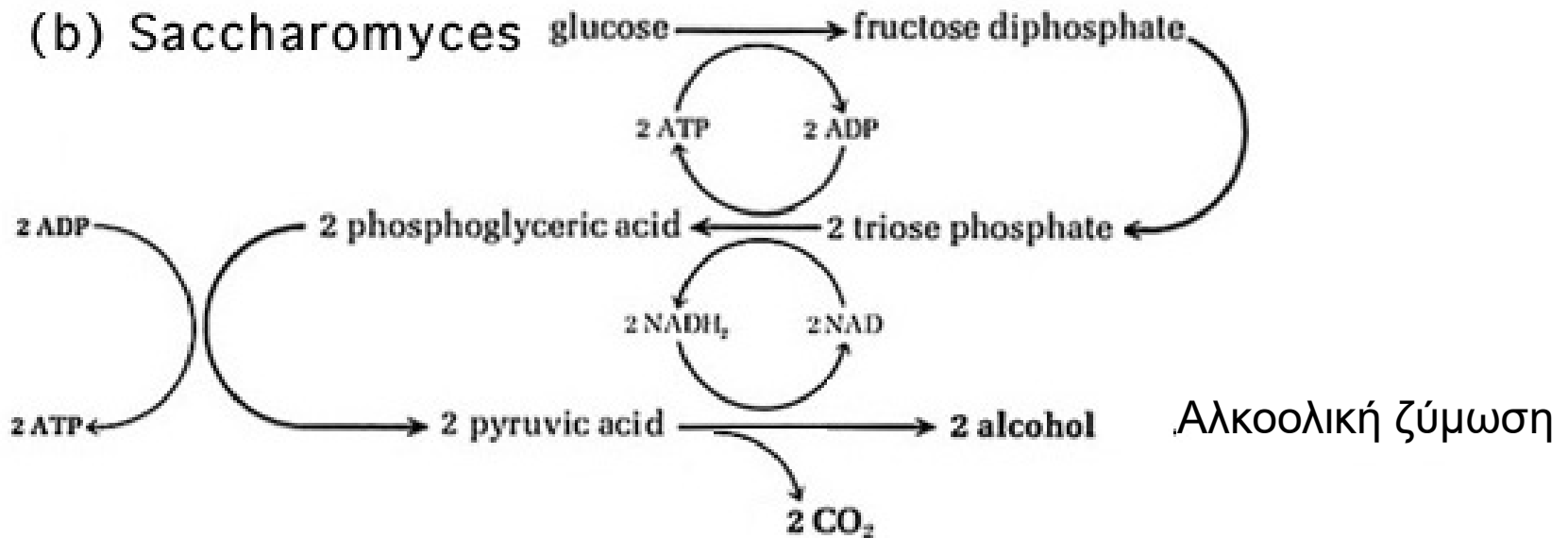
## 2.5.2. Ζύμωση γαλακτικού οξέως

- Παράγονται 2 ATP
- Τελικό προϊόν: γαλακτικό οξύ (*ομοζύμωση*)
- Προκαλεί αλλοίωση των τροφίμων
- Χρησιμοποιείται στην παραγωγή τροφίμων
  - Γιαούρτι                      -    Γάλα
  - Τουρσιά                        -    Αγγούρια
  - Ξινολάχανο                -    Λάχανο
- Γένη:
  - *Streptococcus*
  - *Lactobacillus*

(a) *Lactobacillus*

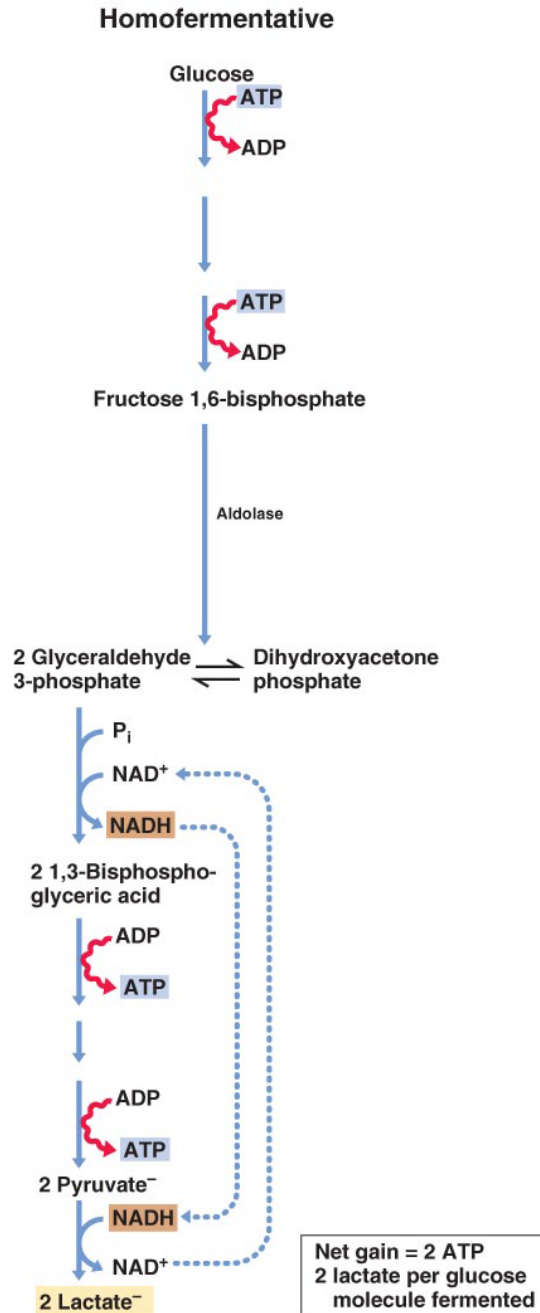


(b) *Saccharomyces*



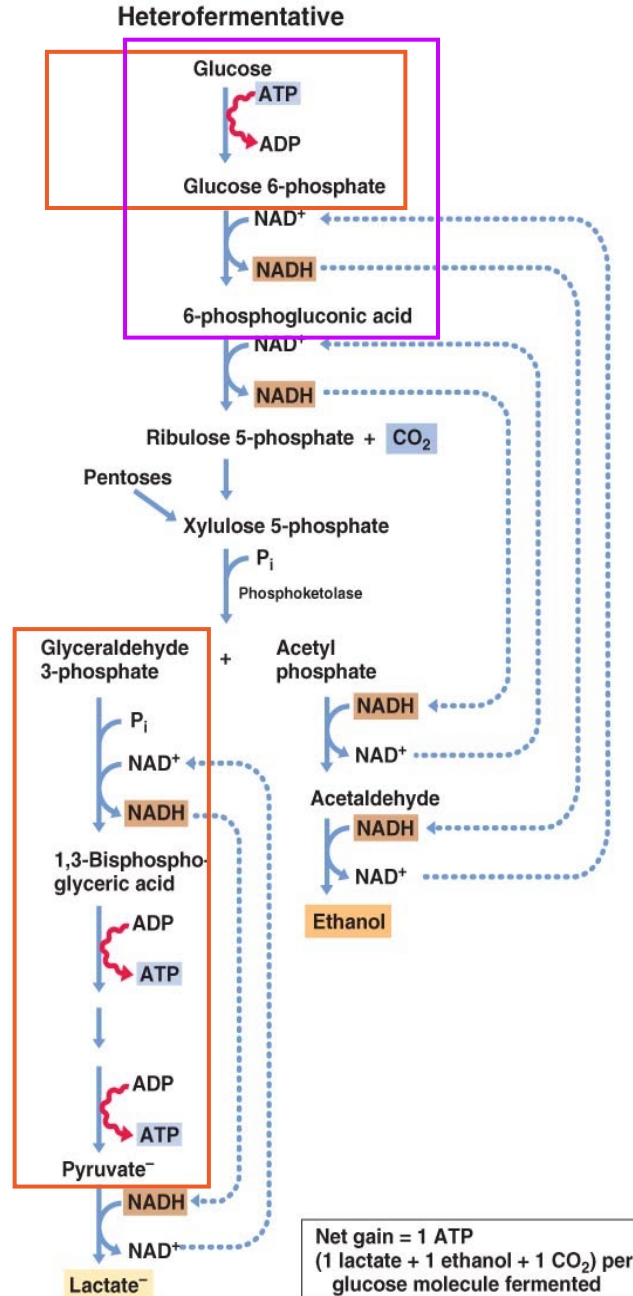


## 2.5.3. Ομοζύμωση γλυκόζης προς γαλακτικό οξύ



## 2.5.4. Ετεροζύμωση γλυκόζης προς γαλακτικό οξύ

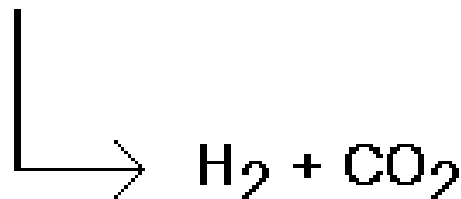
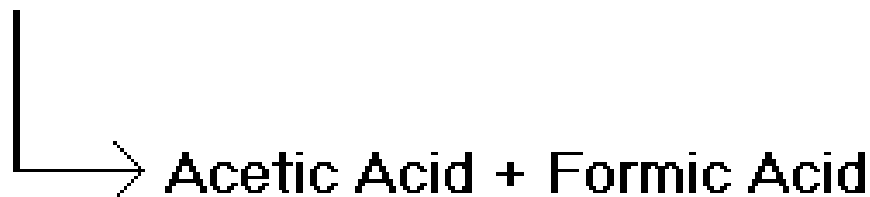
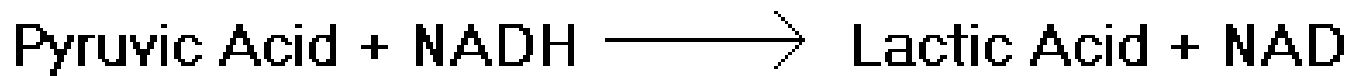
Παράδειγμα τέτοιου οργανισμού;



## 2.5.5. Ζύμωση μικτών οξέων

- Παράγονται 2+2 ATP
- Τελικά προϊόντα - οργανικά οξέα

### Fermentation Pathways: Mixed acid fermentation

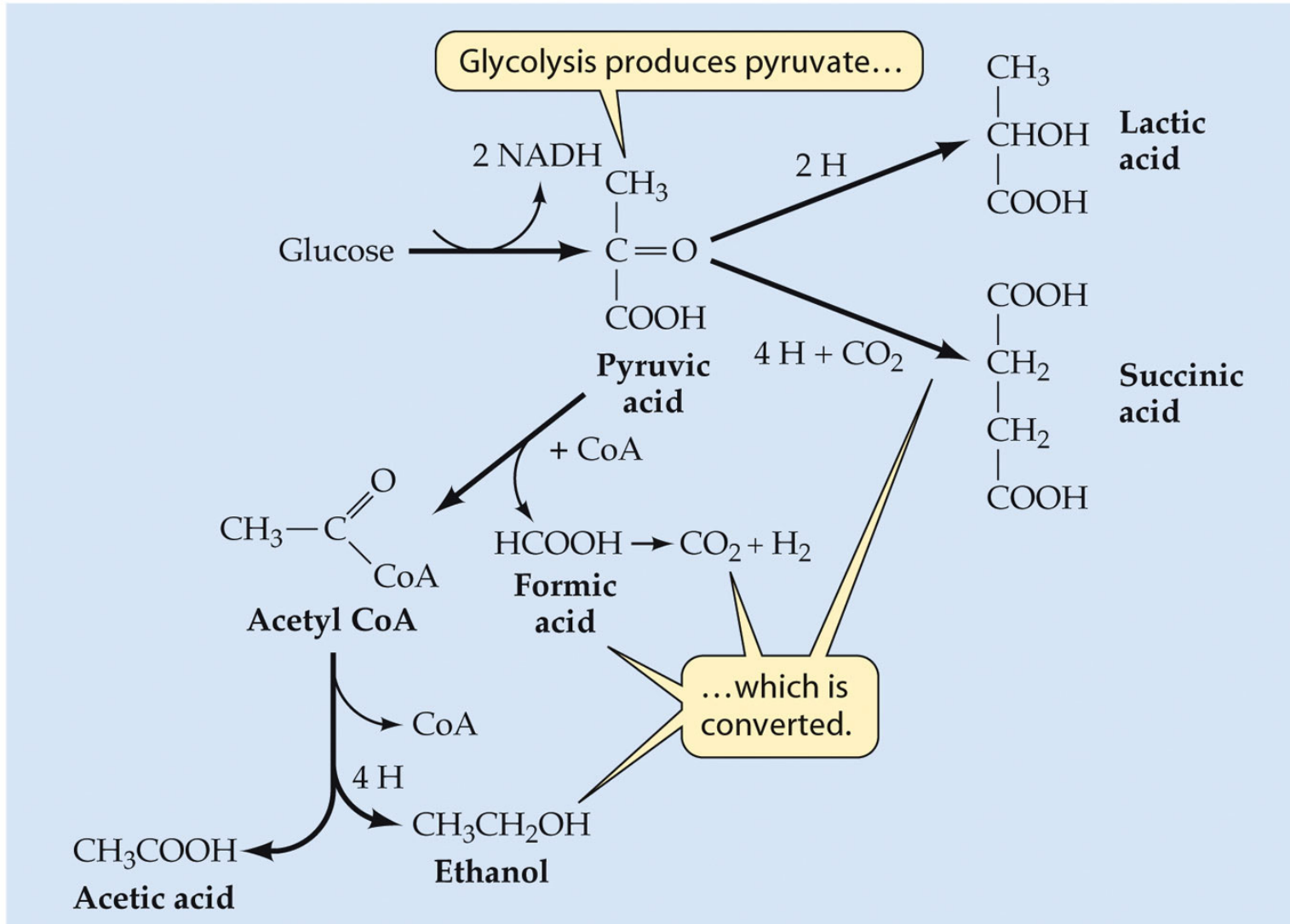


- *Escherichia coli* και άλλα εντεροβακτήρια

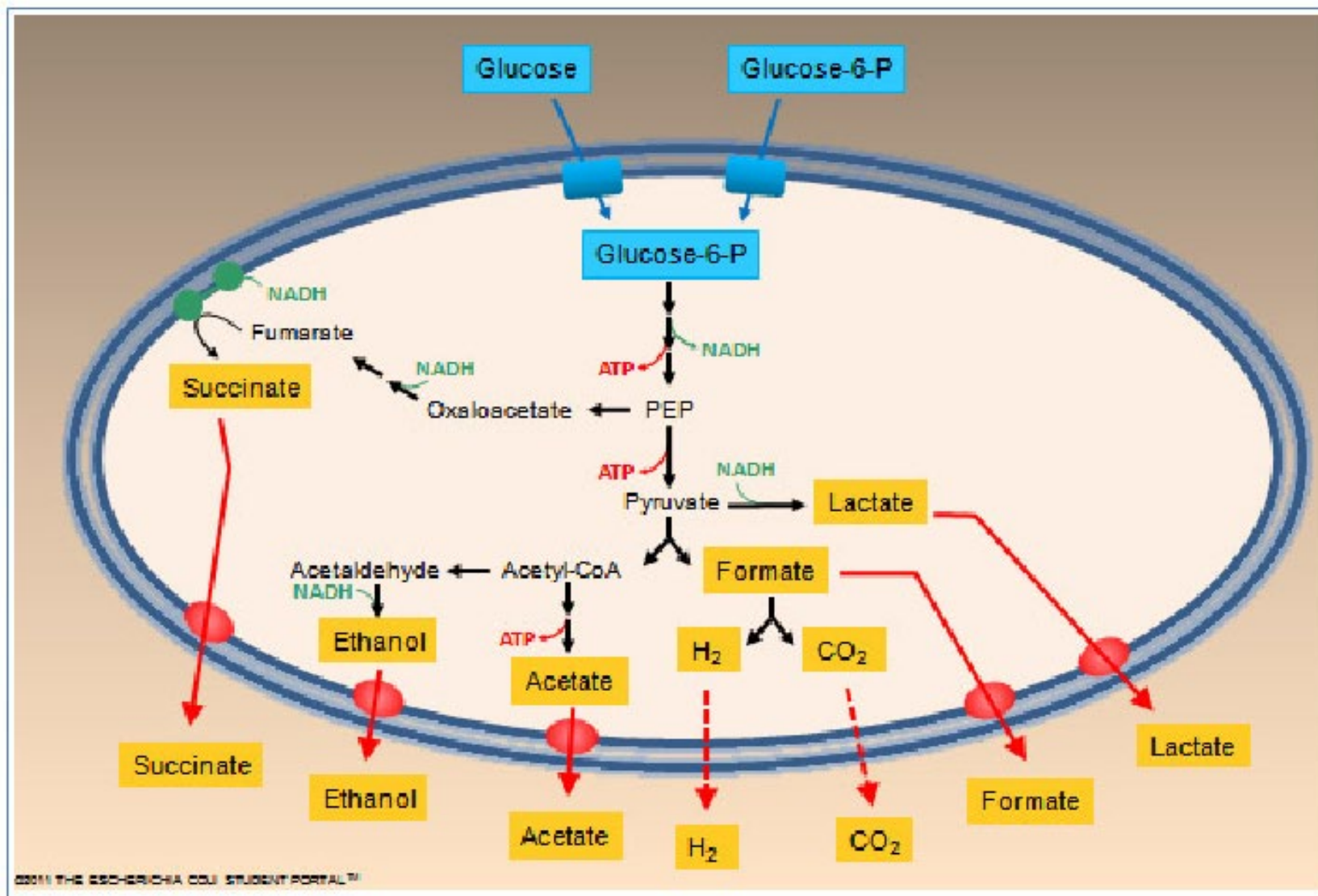
Θυμίζει την Καταβολική οδό της Φωσφοροκετολάσης.

# Ζυμώσεις μικτών οξέων

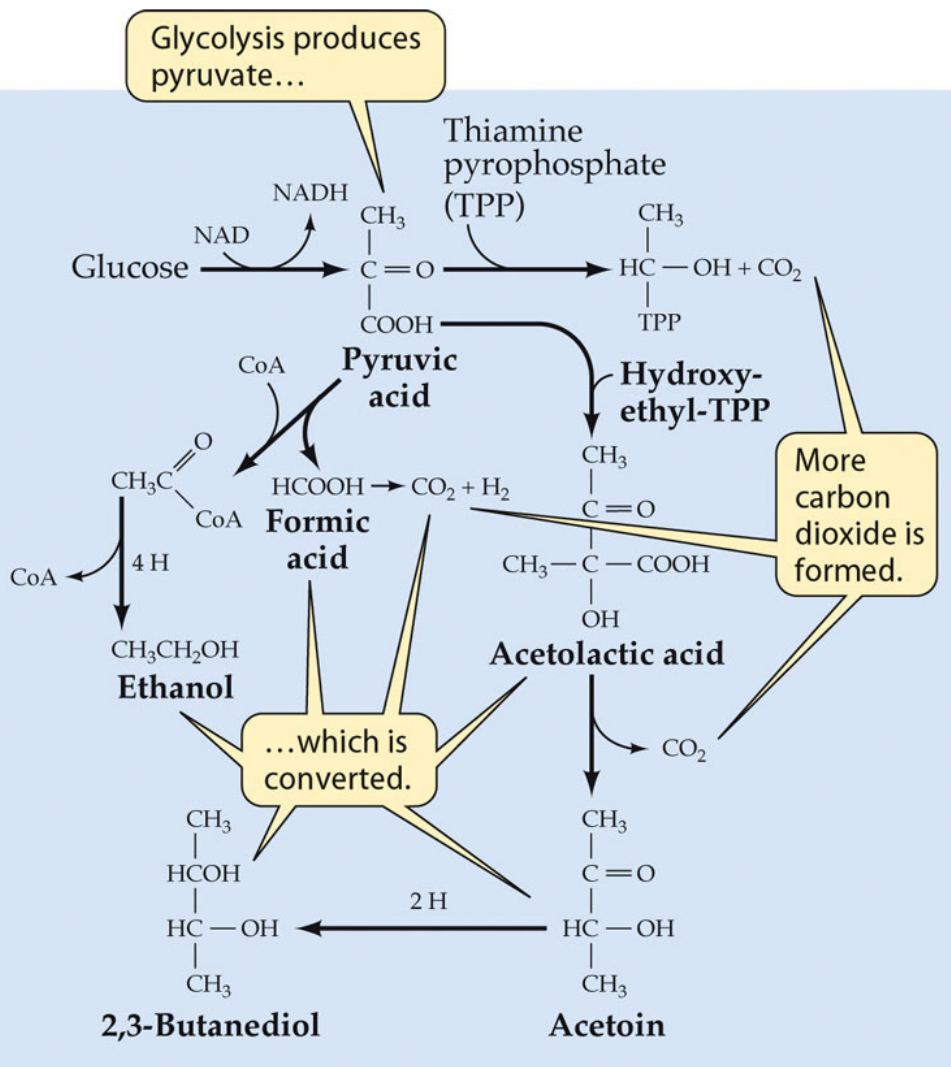
**Ζύμωση μικτών οξέων από την *Escherichia coli*.** Το παραγώμενο από γλυκόλυση (Embden-Meyerhof) πυροσταφυλικό, καταβολίζεται σε ένα μίγμα ενώσεων οξέων.



**Ζύμωση μικτών οξέων από την *Escherichia coli*.** Το παραγώμενο από γλυκόλυση (Embden-Meyerhof) πυροσταφυλικό, καταβολίζεται σε ένα μίγμα ενώσεων οξέων.



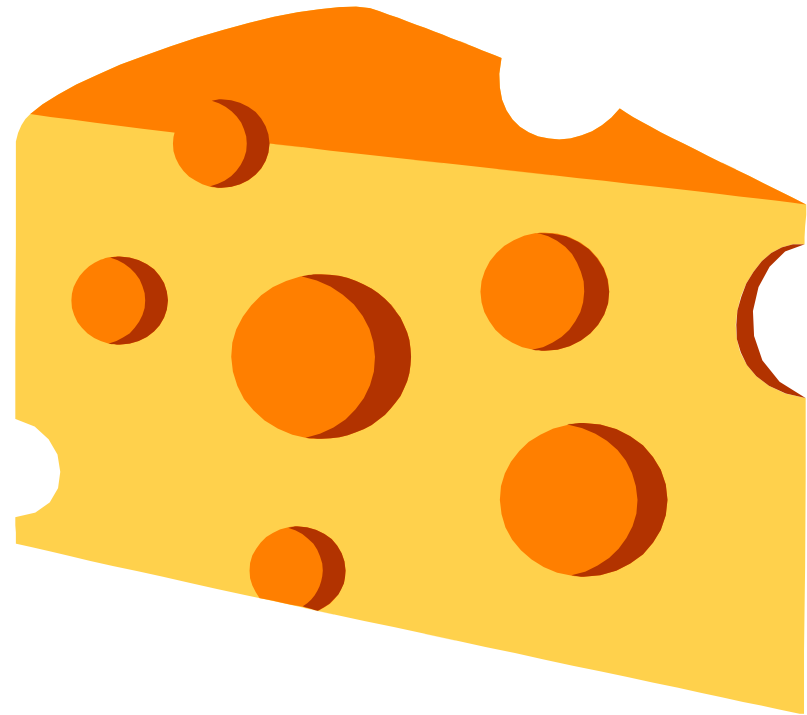
## 2.5.6. Ζύμωση 2,3-βουτανεδιόλης



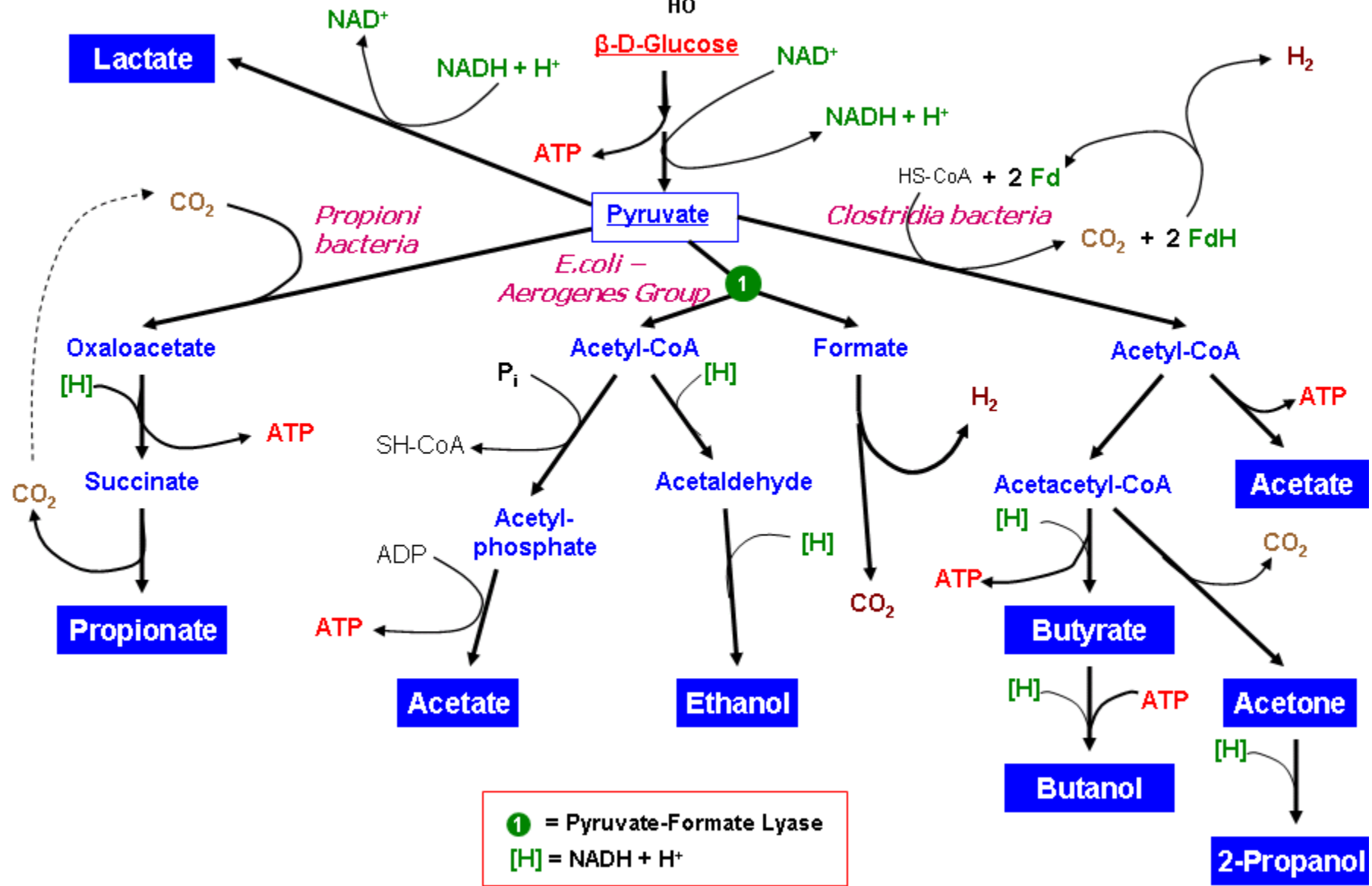
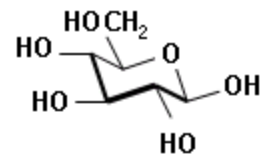
Ζύμωση μικτών οξέων, αλλά με περισσότερα ουδέτερα προϊόντα (2,3-βουτανεδιόλη, αιθανόλη),  $\text{CO}_2$  και  $\text{H}_2$ .

## 2.5.7. Ζύμωση προπιονικού οξέως

- Παράγονται 2+2 ATP
- Τελικά προϊόντα :
  - Προπιονικό οξύ
  - CO<sub>2</sub>
  
- *Propionibacterium sp.*



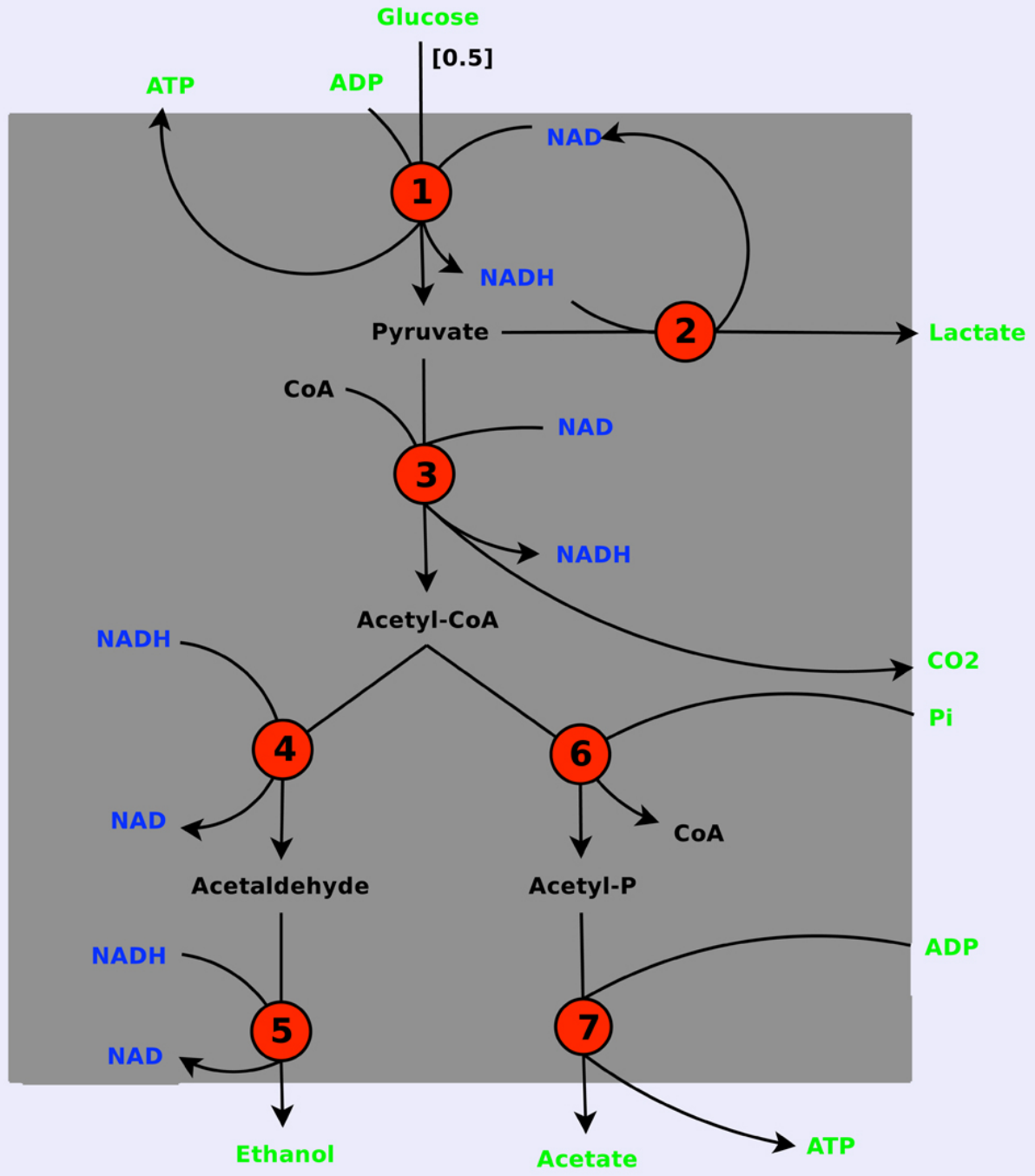
# Σύνοψις



Graphic©E. Schmid-2005



## 2.5.8. Παράδειγμα υπολογιστικού μοντέλου ζυμώσεως



Fermentation pathways in *Lactococcus lactis*. Abbreviations for Equations (11) and (12): PYR, Pyruvate; ACCOA, Acetyl-CoA; ACAL, Acetaldehyde; ACP, Acetyl-P. When processing this model with SymCA, the following expression for  $C_1^{J_2}$  is generated, which we show by way of example: (24 terms)

$$C_1^{J_2} = \left( -\frac{J_1 J_5 J_6 \varepsilon^4 ACAL \varepsilon^7 ACP \varepsilon^6 COA \varepsilon^5 NADH \varepsilon^2 PYR}{COA NADH} + \frac{J_1 J_5 J_6 \varepsilon^5 ACAL \varepsilon^7 ACP \varepsilon^6 COA \varepsilon^4 NADH \varepsilon^2 PYR}{COA NADH} \right. \\ + \frac{J_1 J_5 J_6 \varepsilon^5 ACAL \varepsilon^7 ACP \varepsilon^6 COA \varepsilon^2 NADH \varepsilon^3 PYR}{COA NADH} - \frac{J_1 J_5 J_6 \varepsilon^5 ACAL \varepsilon^7 ACP \varepsilon^6 COA \varepsilon^3 NADH \varepsilon^2 PYR}{COA NADH} \\ - \frac{J_1 J_3 J_6 \varepsilon^4 ACAL \varepsilon^7 ACP \varepsilon^6 COA \varepsilon^2 NADH \varepsilon^3 PYR}{COA NADH} + \frac{J_1 J_3 J_6 \varepsilon^4 ACAL \varepsilon^7 ACP \varepsilon^6 COA \varepsilon^3 NADH \varepsilon^2 PYR}{COA NADH} \\ + \frac{J_1 J_5 J_6 \varepsilon^4 ACAL \varepsilon^6 ACCOA \varepsilon^7 ACP \varepsilon^5 NADH \varepsilon^2 PYR}{ACCOA NADH} - \frac{J_1 J_5 J_6 \varepsilon^5 ACAL \varepsilon^6 ACCOA \varepsilon^7 ACP \varepsilon^4 NADH \varepsilon^2 PYR}{ACCOA NADH} \\ + \dots \\ \left. - \frac{J_1 J_3 J_6 \varepsilon^4 ACAL \varepsilon^6 ACCOA \varepsilon^7 ACP \varepsilon^2 NADH \varepsilon^3 PYR}{ACCOA NADH} + \frac{J_1 J_3 J_6 \varepsilon^4 ACAL \varepsilon^6 ACCOA \varepsilon^7 ACP \varepsilon^3 NADH \varepsilon^2 PYR}{ACCOA NADH} \right) / \Sigma \quad (11)$$

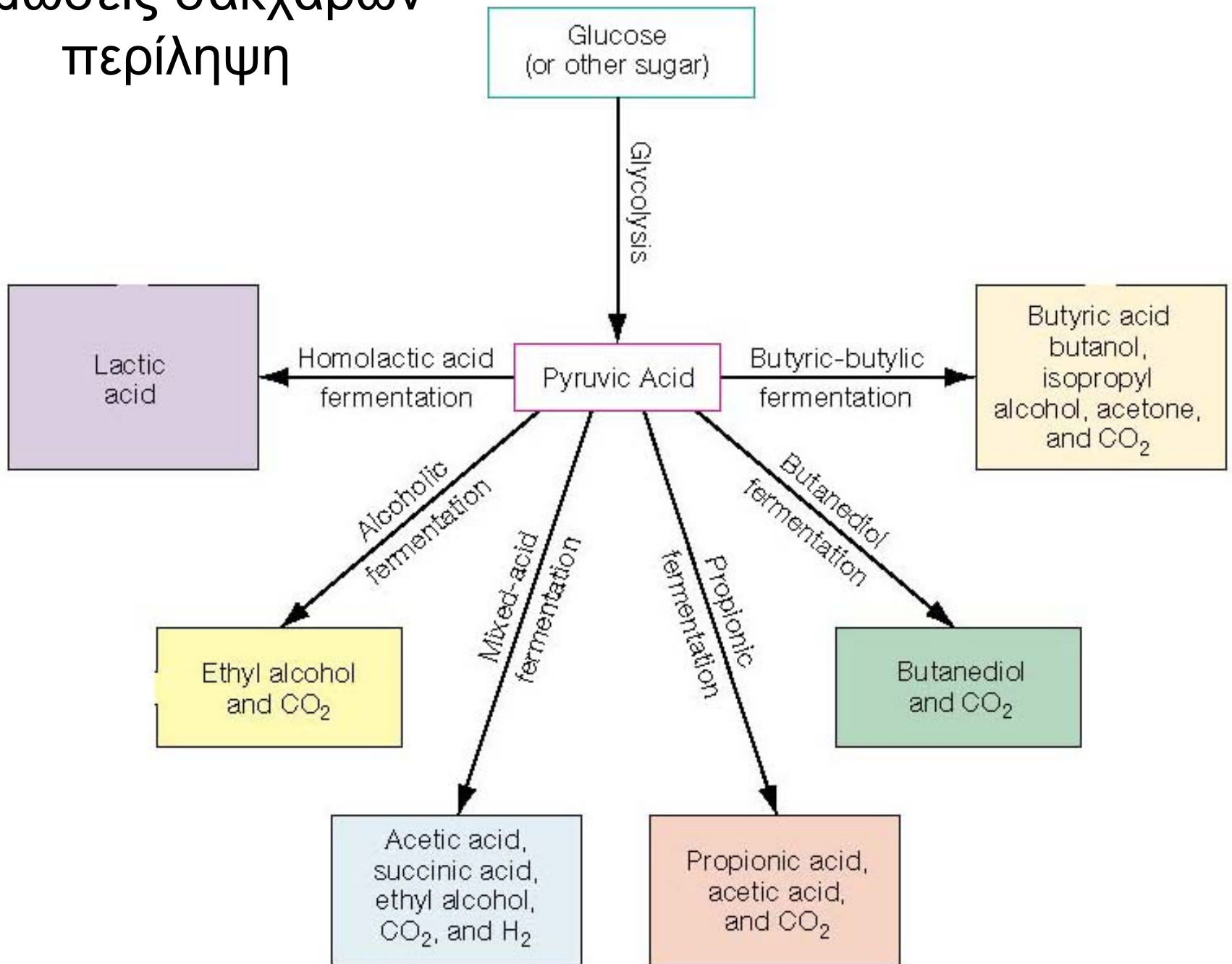
$$\Sigma = \frac{J_3 J_5 J_6 \varepsilon^4 ACAL \varepsilon^7 ACP \varepsilon^6 COA \varepsilon^5 NADH \varepsilon^3 PYR}{COA NADH} + \frac{J_2 J_5 J_6 \varepsilon^4 ACAL \varepsilon^7 ACP \varepsilon^6 COA \varepsilon^5 NADH \varepsilon^2 PYR}{COA NADH} \\ - \frac{J_1 J_5 J_6 \varepsilon^4 ACAL \varepsilon^7 ACP \varepsilon^6 COA \varepsilon^5 NADH \varepsilon^1 PYR}{COA NADH} - \frac{J_3 J_5 J_6 \varepsilon^5 ACAL \varepsilon^7 ACP \varepsilon^6 COA \varepsilon^4 NADH \varepsilon^3 PYR}{COA NADH} \\ - \frac{J_2 J_5 J_6 \varepsilon^5 ACAL \varepsilon^7 ACP \varepsilon^6 COA \varepsilon^4 NADH \varepsilon^2 PYR}{COA NADH} + \frac{J_1 J_5 J_6 \varepsilon^5 ACAL \varepsilon^7 ACP \varepsilon^6 COA \varepsilon^4 NADH \varepsilon^1 PYR}{COA NADH} \\ + \dots \\ + \frac{J_2 J_3 J_6 \varepsilon^4 ACAL \varepsilon^6 ACCOA \varepsilon^7 ACP \varepsilon^2 NADH \varepsilon^3 PYR}{ACCOA NADH} - \frac{J_1 J_3 J_6 \varepsilon^4 ACAL \varepsilon^6 ACCOA \varepsilon^7 ACP \varepsilon^1 NADH \varepsilon^3 PYR}{ACCOA NADH} \\ - \frac{J_2 J_3 J_6 \varepsilon^4 ACAL \varepsilon^6 ACCOA \varepsilon^7 ACP \varepsilon^3 NADH \varepsilon^2 PYR}{ACCOA NADH} + \frac{J_1 J_3 J_6 \varepsilon^4 ACAL \varepsilon^6 ACCOA \varepsilon^7 ACP \varepsilon^3 NADH \varepsilon^1 PYR}{ACCOA NADH} \quad (12)$$

## Metabolic control analysis

<http://www.beilstein-institut.de/escec2007/proceedings/Rohwer/Rohwer.html>

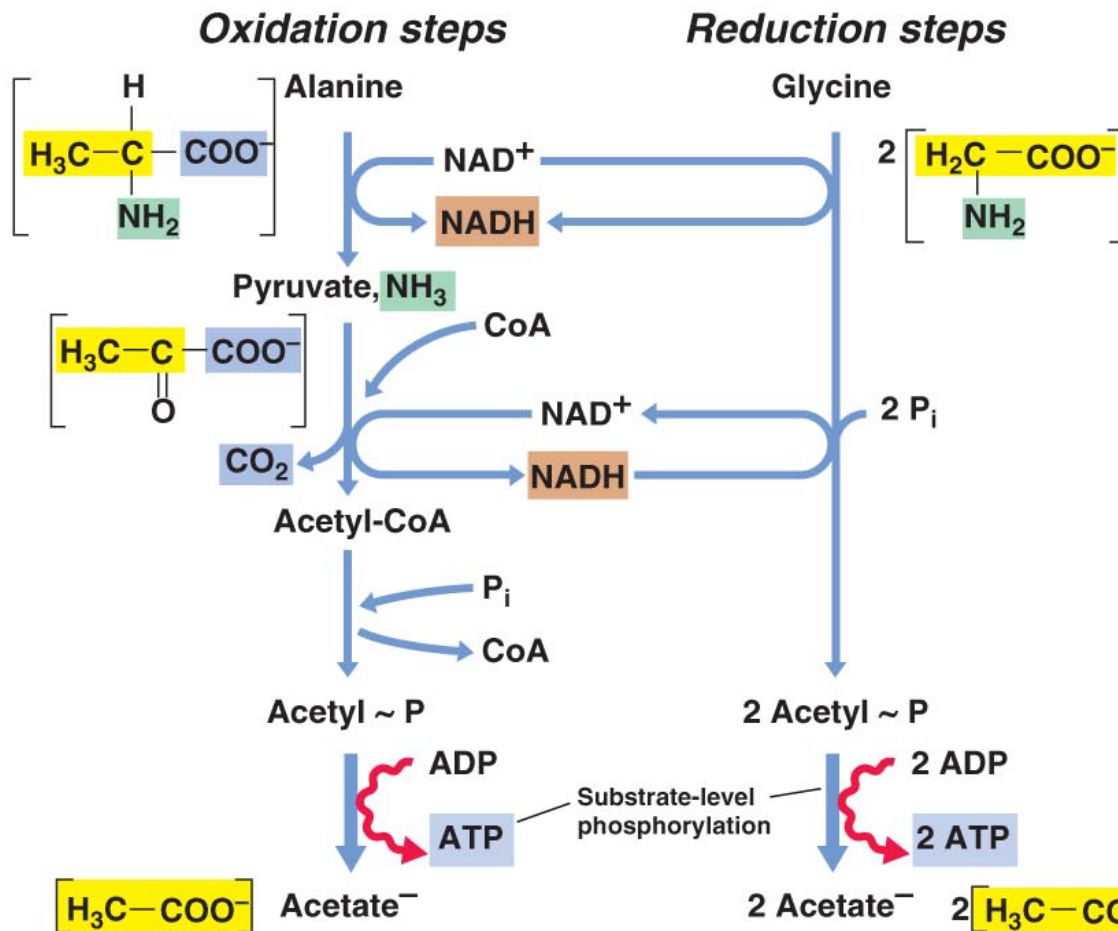
with the denominator  $\Sigma$  given by: (56 terms)

# Ζυμώσεις σακχάρων περίληψη



## 2.5.9. Ζύμωση αμινοξέων από *Clostridium sp.*:

η αντίδραση Stickland



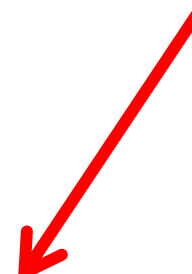
Amino acids participating in coupled fermentations (Stickland reaction)

Amino acids oxidized:

Alanine  
Leucine  
Isoleucine  
Valine  
Histidine

Amino acids reduced:

Glycine  
Proline  
Hydroxyproline  
Tryptophan  
Arginine



Overall: Alanine + 2 Glycine + 2 H<sub>2</sub>O + 3 ADP + 3 P<sub>i</sub> → 3 Acetate<sup>-</sup> + CO<sub>2</sub> + 3 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> + 3 ATP

## 2.5.10. Δευτερογενείς ζυμώσεις

- Δευτερογενής ζύμωση

Ο καταβολισμός των προϊόντων της πρωτογενούς ζυμώσεως

– *Kluyveromyces kluyveri*

Αιθανόλη + οξικό → καπροϊκό + βουτυρικό +  $v\text{ATP}$

– *Propionibacterium*

Γαλακτικό → προπιονικό + οξικό +  $v\text{ATP}$

Γιατί οι δευτερογενείς ζυμώσεις;

Γλυκόζη → 2 γαλακτικά  $\Delta G^{\circ} = -196 \text{ kJ/mol}$

+ 2 ATPs = +63 kJ/mol

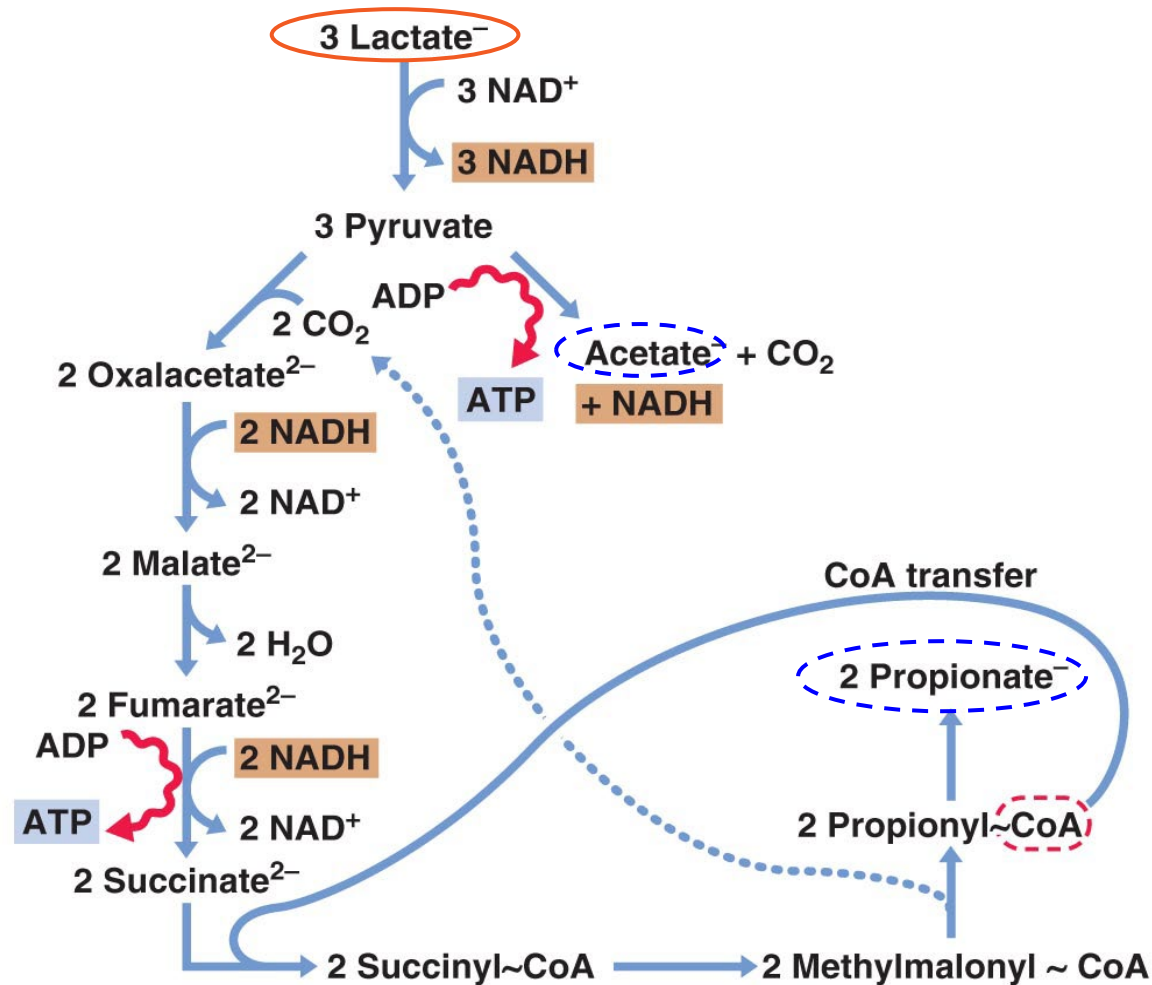
---

-133 kJ/mol έμειναν στο γαλακτικό

Απώλεια ενέργειας!

Οι δευτερογενείς ζυμώσεις εξασφαλίζουν περισσότερη ενέργεια ( $\text{ATP}$ ) από τον καταβολισμό των προϊόντων της πρωτογενούς ζυμώσεως.

# Ζύμωση προπιονικού οξέως στο *Propionibacterium*



Overall reaction:

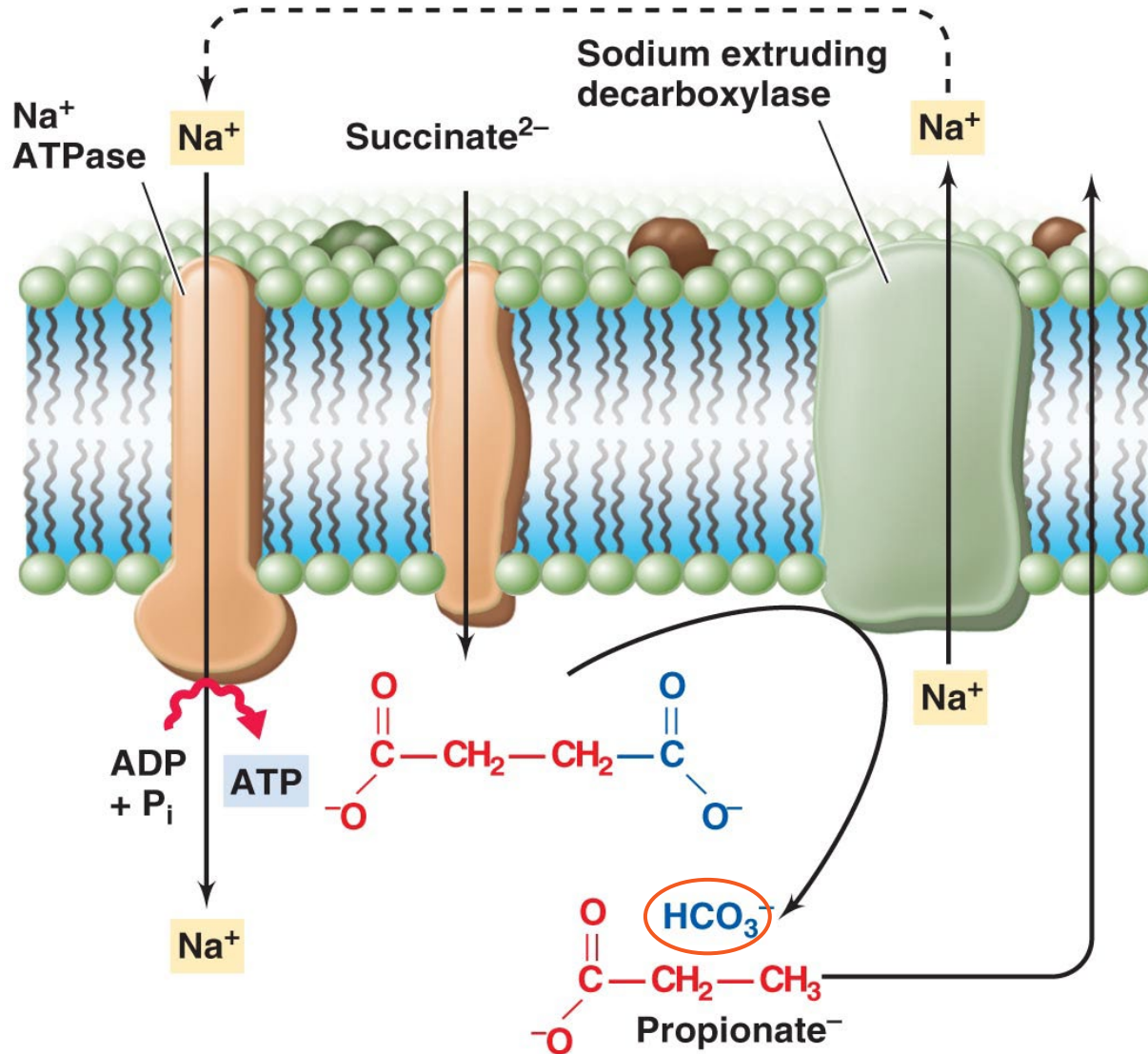


## 2.5.11. Ζυμώσεις που δεν δίνουν φωσφορυλίωση σε επίπεδο υποστρώματος

- Οι ζυμώσεις ορισμένων ενώσεων δε δίνουν αρκετή ενέργεια για τη σύνθεση ATP
  - Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο καταβολισμός της ενώσεως μπορεί να συνδεθεί με αντλίες ιόντων που εξασφαλίζουν χημειώσμωση πρωτονίων ή ιόντων νατρίου

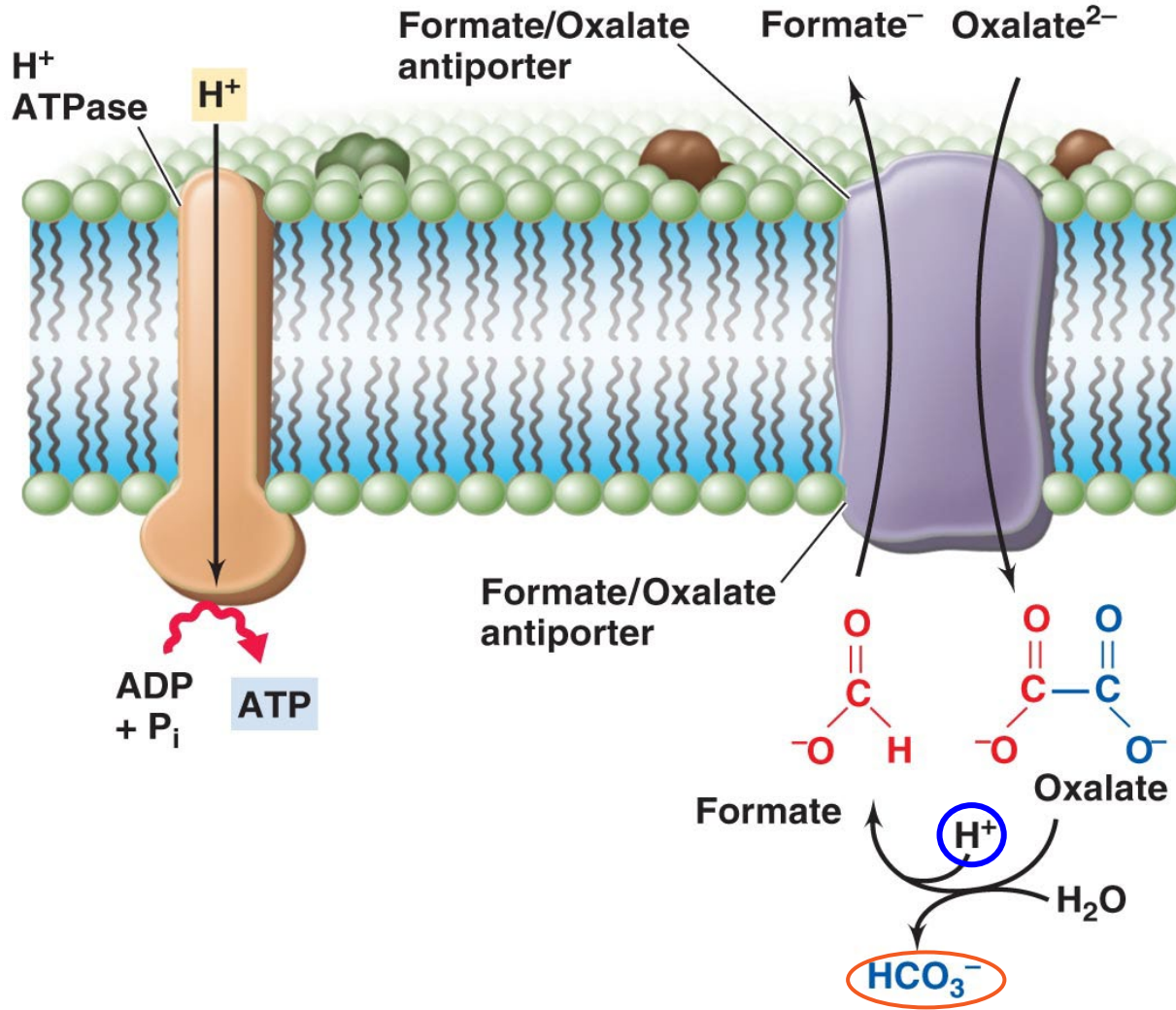


# Ζύμωση ηλεκτρικού από το *Propionigenium modestum*



Η εξεργονική αποκαρβοξυλίωση του ηλεκτρικού δίνει την ενέργεια για τη μεταφορά **Na<sup>+</sup>** στον εξωτερικό χώρο και τη δημιουργία κλίσης **[Na<sup>+</sup>]**.

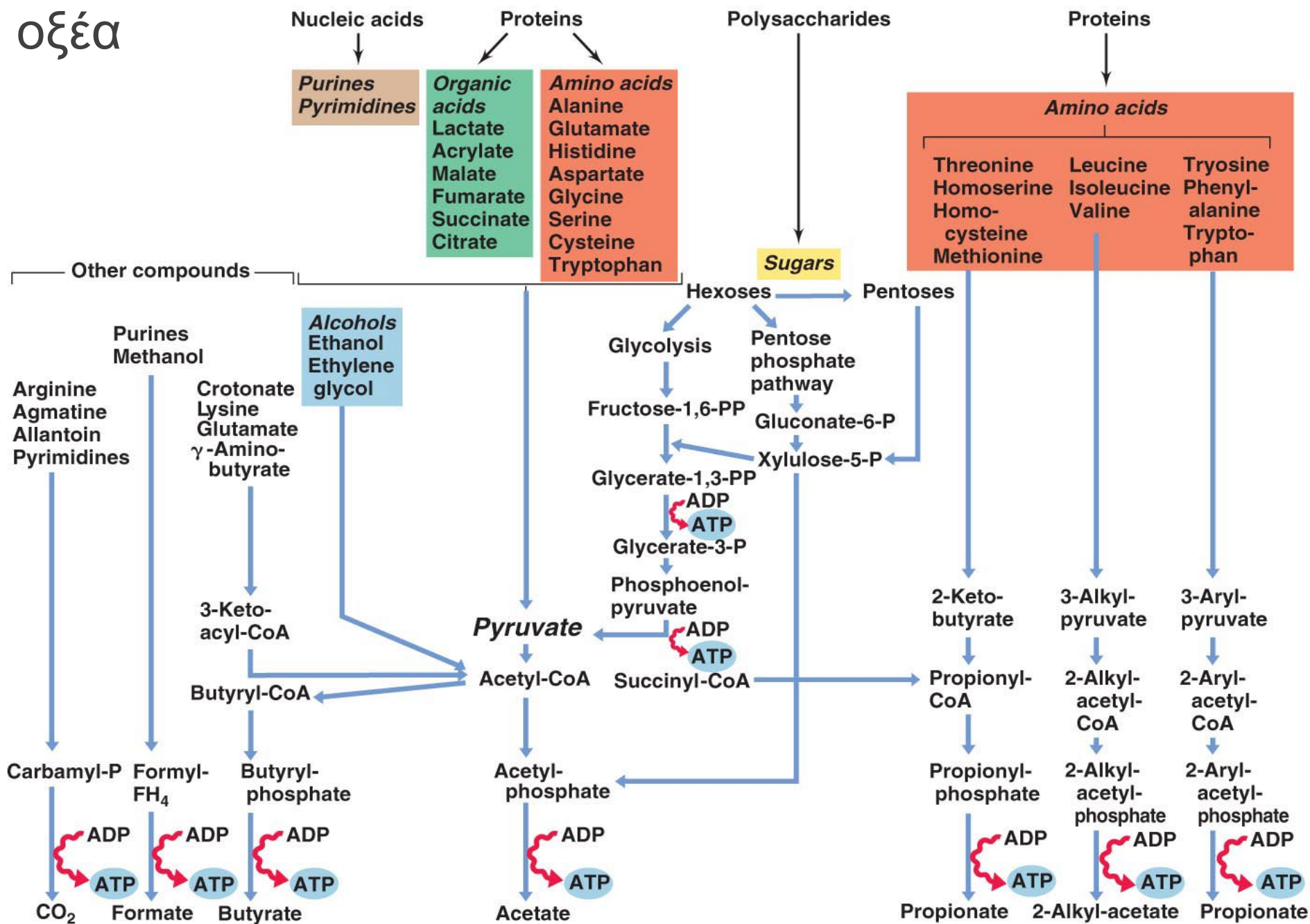
# Ζύμωση οξαλικών από το *Oxalobacter formigenes*



(b)

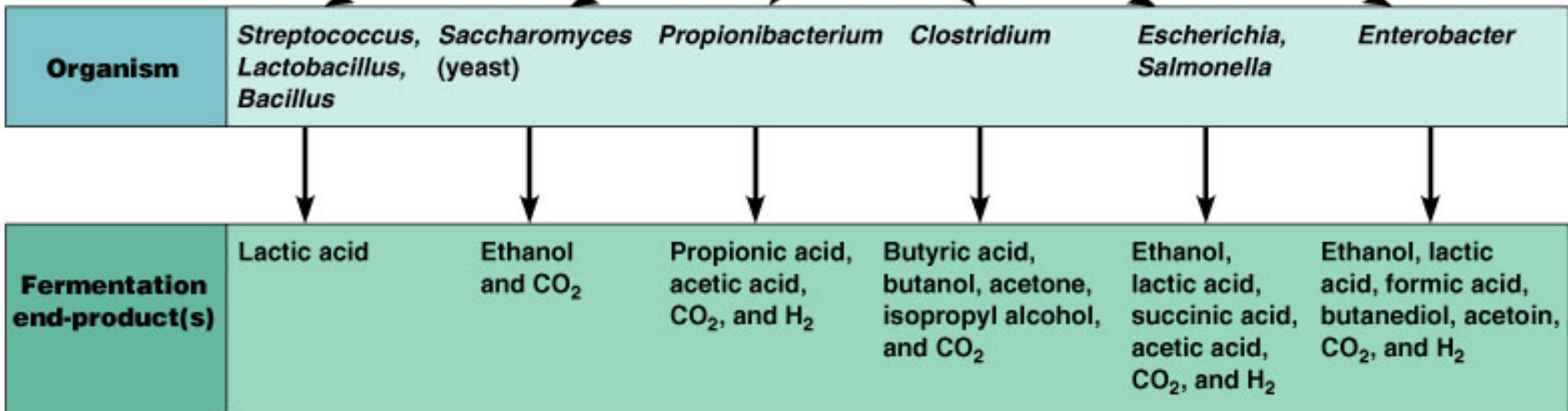
Δημιουργία ηλεκτρικού δυναμικού λόγω δημιουργίας κλίσης φορτίων εντός και εκτός της μεμβράνης: αύξηση του εσωτερικού pH λόγω κατανάλωσης πρωτονίων και εισόδου ενός επιπλέον αρνητικού φορτίου

# 2.5.12. Ζυμώσεις από σάκχαρα, πρωτεΐνες, νουκλεϊκά οξέα



# Ζυμώσεις σακχάρων-οργανισμοί

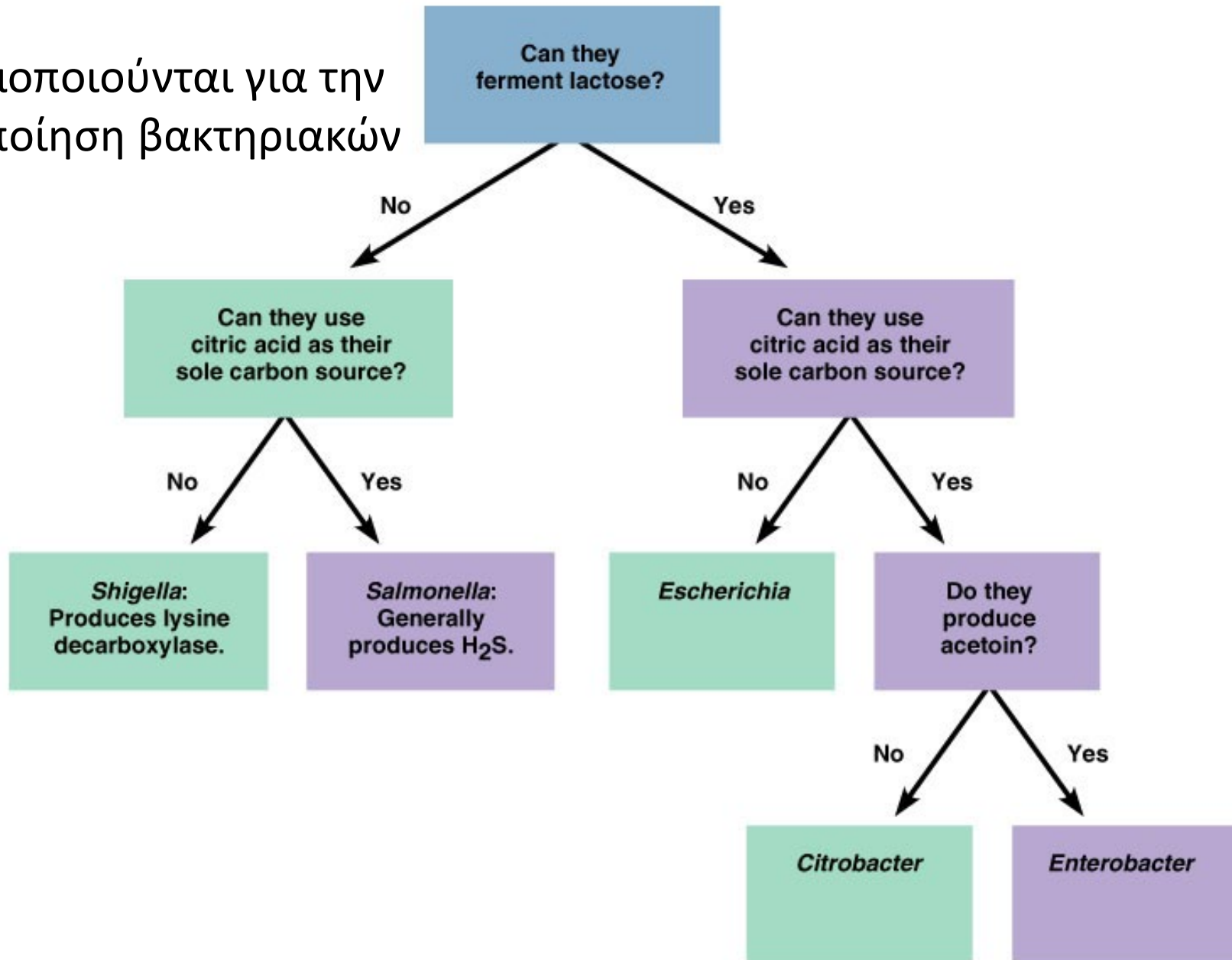
**Pyruvic Acid**



(b)

## 2.5.13. Βιοχημικά τεστ μεταβολισμού

- Χρησιμοποιούνται για την ταυτοποίηση βακτηριακών ειδών



- Ο καταβολισμός των σακχάρων είναι η πηγή ενέργειας (ATP) για τα έμβια.
- Η διάσπαση των σακχάρων (καταβολισμός) γίνεται με δύο γενικούς τρόπους:

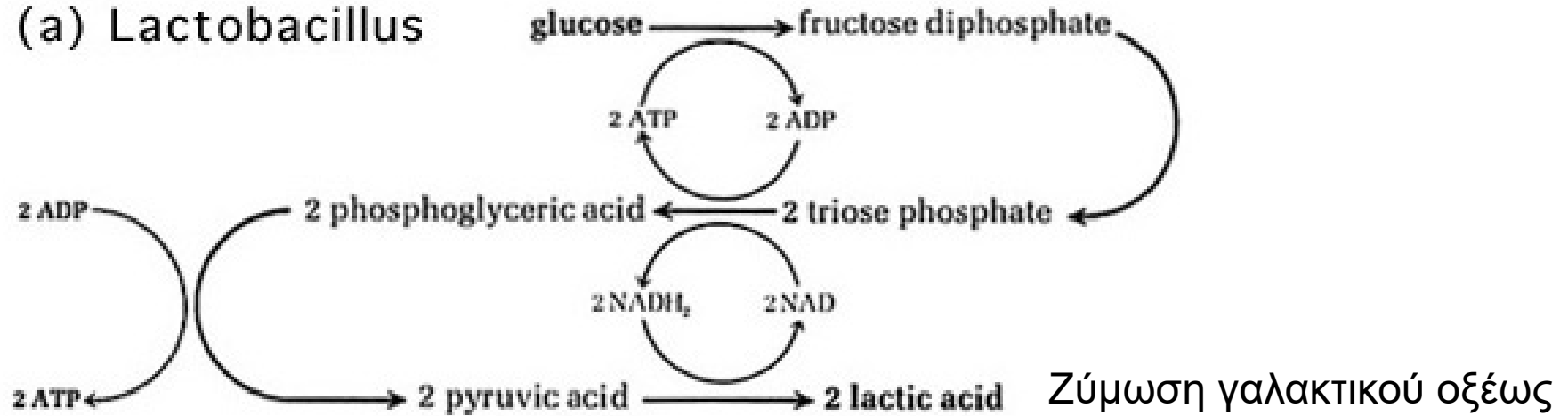
## 1. Αναπνοή

- Οξείδωση οργανικών μορίων από αλυσίδα μεταφοράς  $e^-$  σε ένωση υψηλού δυναμικού αναγωγής.
- Αεροβική: η ένωση είναι το  $O_2$ .
- Αναεροβική: η ένωση είναι μόριο διαφορετικό από το οξυγόνο (π.χ.  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ).
- Με χημειώσωση δημιουργείται ATP.

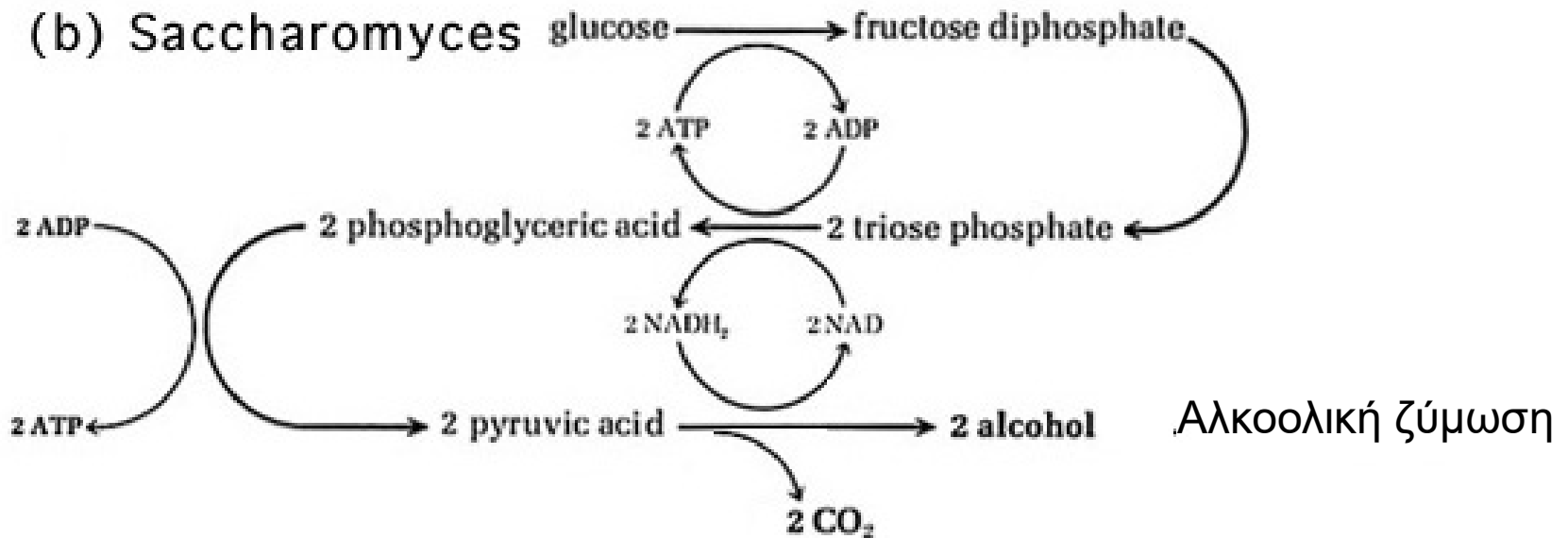
## 2. Ζυμώσεις

- Κοινός μεταβολικός δρόμος γλυκόλυσης και αναεροβικής οξείδωσης (συνήθως πυροσταφυλικού οξέως) με ανακύκλωση  $NAD^+/NADH$ . Δεν έχουμε χημειώσωση. Το ATP δημιουργείται στη γλυκόλυση.

(a) *Lactobacillus*



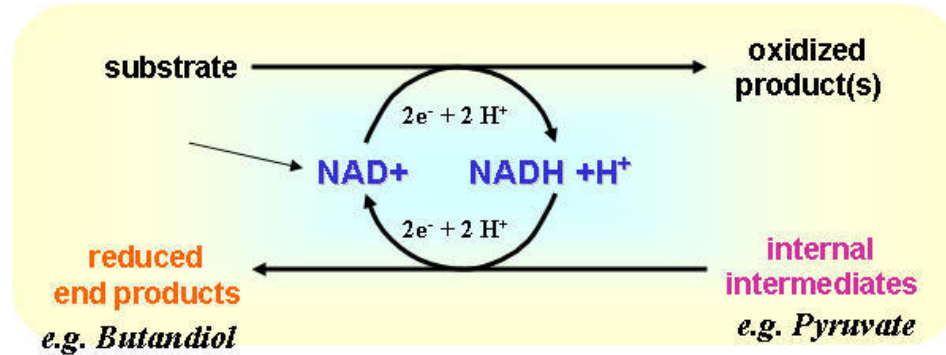
(b) *Saccharomyces*



# Διαφορά ζύμωσης και αναπνοής

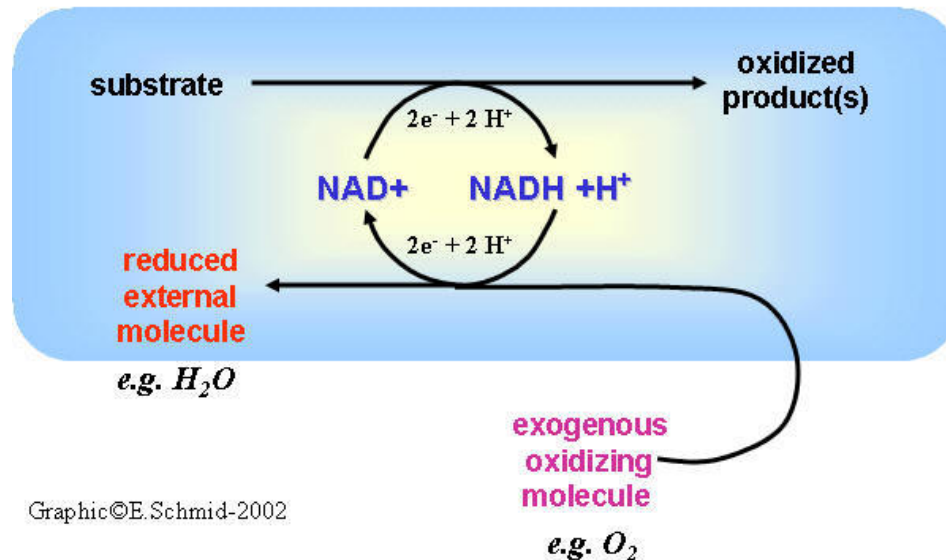
## Fermentation:

- organic substrates, e.g. glucose, are metabolized **without** the involvement of an exogenous (external) oxidizing molecule, e.g.  $O_2$
- fermentation is typically (but not necessarily) anaerob



## Respiration:

- organic substrates, e.g. glucose, are metabolized **with** the involvement of an **exogenous (external) oxidizing molecule**





## 2.6. Αναεροβική αναπνοή

# Κύριοι οδοί παραγωγής ενέργειας (ATP) στο μικροβιακό κύτταρο

## 1. Φωσφορυλίωση σε επίπεδο υποστρώματος

Αναγέννηση ATP (ή GTP) στο κυτταρόπλασμα από τη μεταφορά μιας φωσφορικής ομάδας ( $\text{PO}_3$ ) σε ADP (ή GDP) από ένα **φωσφορυλιωμένο μόριο υψηλής ενέργειας** μέσω κατάλληλης κινάσης (π.χ. PEP και καρβόξυ-κινάση του φωσφο-ενόλο-πυροσταφυλικού). Παράδειγμα: γλυκόλυση/ζυμώσεις.

## 2. Οξειδωτική φωσφορυλίωση

Αναγέννηση ATP από την κλίση  $\text{H}^+$  εγκαρσίως της κυτταροπλασματικής μεμβράνης (πυροσταφυλικό και μετά). Παράδειγμα: αναπνευστική αλυσίδα.

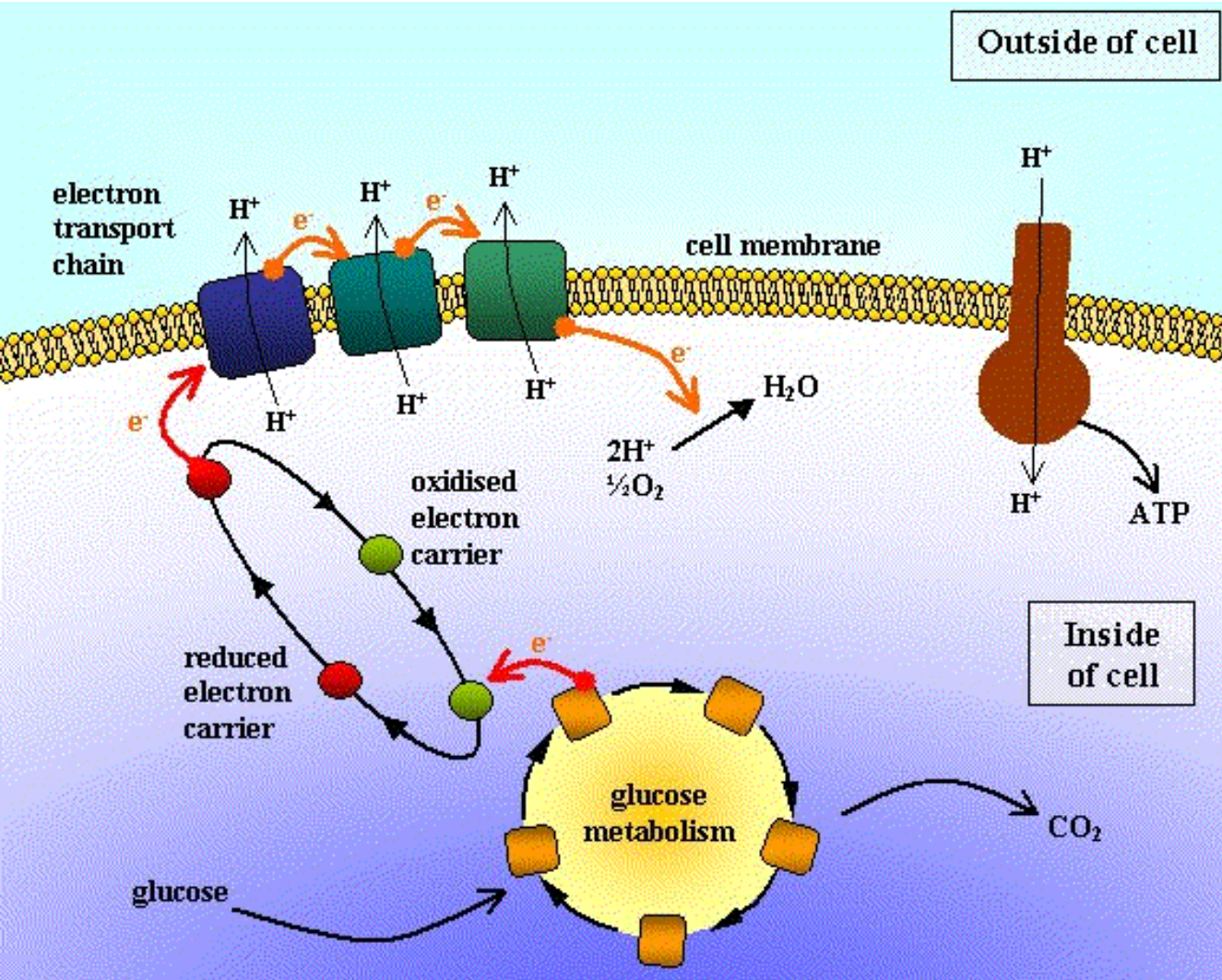
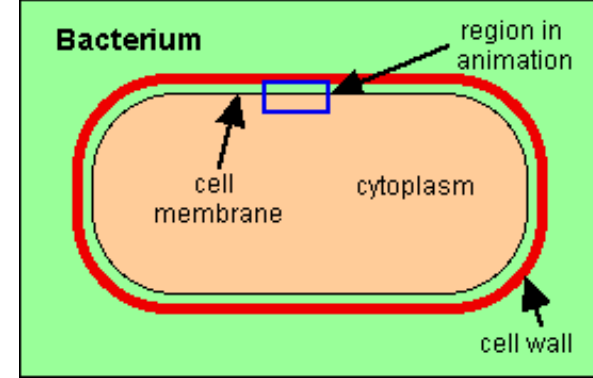
## 2.6. Αναεροβική αναπνοή

- 2.6.1. Αναεροβικός μεταβολισμός: Γενικές αρχές
- 2.6.2. Αναγωγή νιτρικών και απονιτρίωση (denitrification)
- 2.6.3. Αναγωγή θειικών και θείου
- 2.6.4. Αναγωγή CO<sub>2</sub> σε οξικό
- 2.6.5. Μεθανογένεση
- 2.6.6. Αναγωγή πρωτονίων
- 2.6.7. Άλλοι αποδέκτες ηλεκτρονίων
- 2.6.8. Συνδυαστική αναεροβική οξείδωση και αναγωγή από

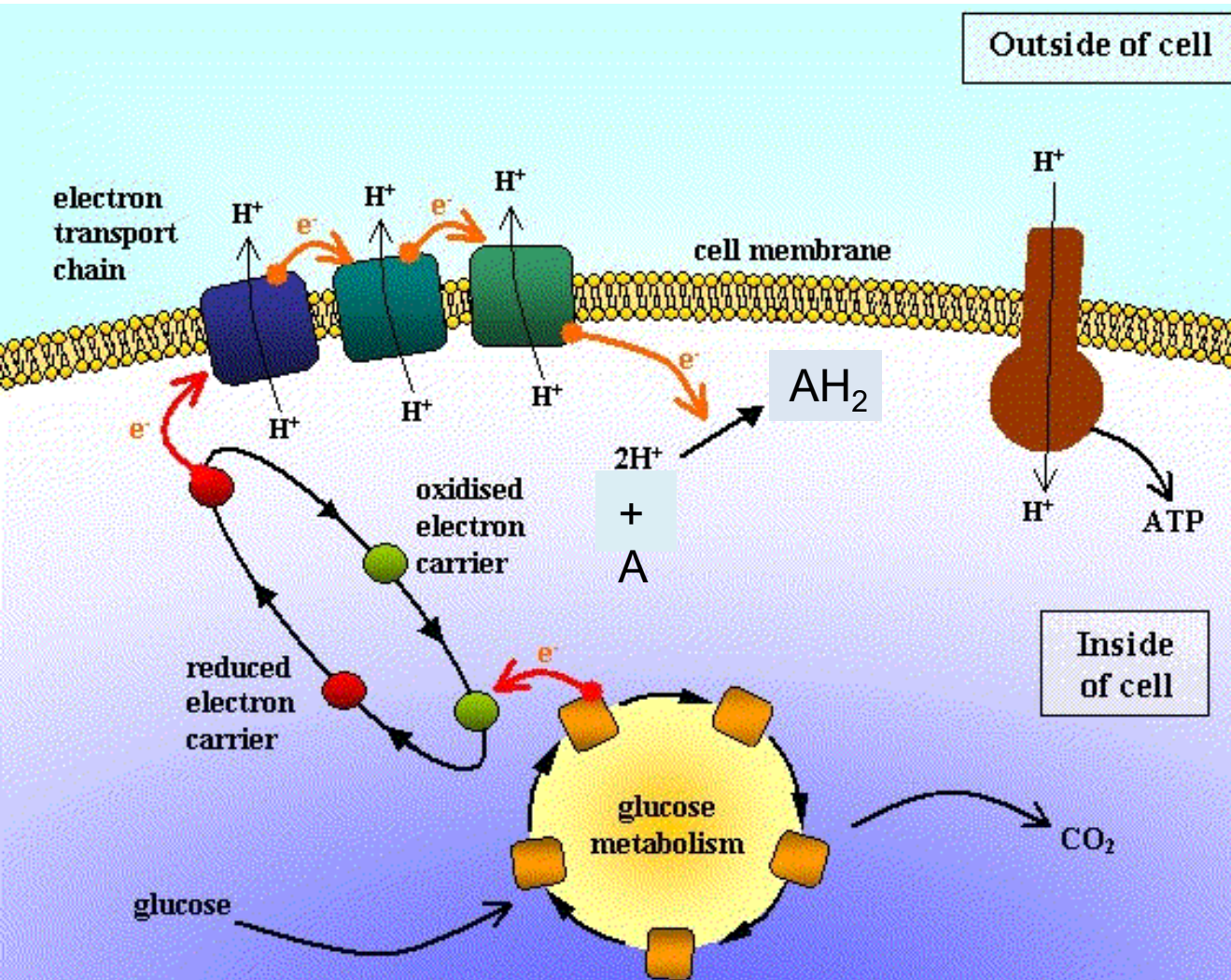
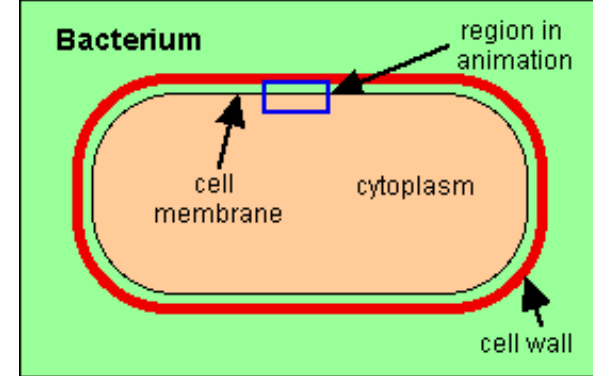
βιοκοινότητες

[https://www.researchgate.net/publication/313544045\\_Anaerobic\\_Digestion\\_I\\_A\\_Common\\_Process\\_Ensuring\\_Energy\\_Flow\\_and\\_the\\_Circulation\\_of\\_Matter\\_in\\_Ecosystems\\_II\\_A\\_Tool\\_for\\_the\\_Production\\_of\\_Gaseous\\_Biofuels](https://www.researchgate.net/publication/313544045_Anaerobic_Digestion_I_A_Common_Process_Ensuring_Energy_Flow_and_the_Circulation_of_Matter_in_Ecosystems_II_A_Tool_for_the_Production_of_Gaseous_Biofuels)

# Χημειώσωση σε βακτήρια παρουσία $O_2$

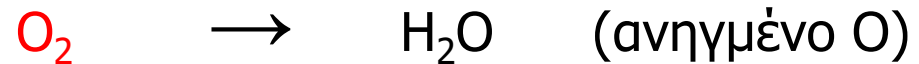


# Γενικευμένη Χημειώσωση στα βακτήρια

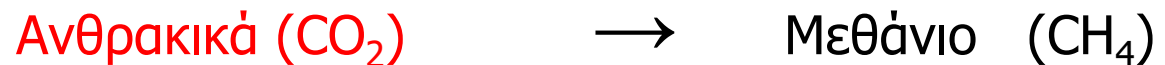
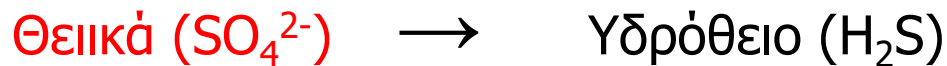
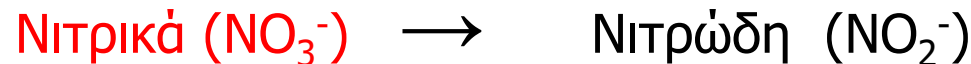


## 2.6.1. Αναεροβικός μεταβολισμός: Γενικές αρχές

- Τα ηλεκτρόνια που προέρχονται από την οξείδωση οργανικής ενώσεως μεταφέρονται μέσω αλυσίδας *όχι στο οξυγόνο*:



- αλλά σε:

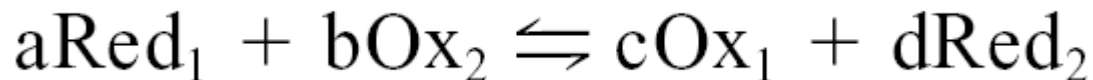


- Η γενική αρχή λειτουργίας των αεροβικών και αναεροβικών συστημάτων είναι γενικά η ίδια, ωστόσο η αναεροβική αναπνοή δίνει λιγότερη ενέργεια διότι η διαφορά δυναμικού μέχρι το μοριακό οξυγόνο είναι μεγαλύτερη.

## 2.6.1. Αναεροβικός μεταβολισμός: Γενικές αρχές

- Το μέγεθος της ενέργειας που απελευθερώνεται από τις διαφορετικές ροές ηλεκτρονίων μπορεί να υπολογισθεί από τις διαφορές δυναμικού ( $\Delta E$ ) των εμπλεκόμενων μορίων.
- Οι διαφορές δυναμικού θα δώσουν τις διαφορές στην ελεύθερη ενέργεια ( **$\Delta E$ , εξίσωση Nernst**).

$$\Delta G = -nF\Delta E$$



$$\Delta G = -nF\Delta E^0 + RT \ln \frac{[\text{Ox}_1]^c [\text{Red}_2]^d}{[\text{Red}_1]^a [\text{Ox}_2]^b}$$

$\Delta E$

Η  $\Delta G$  εξαρτάται από την  $\Delta E_0$  (δυναμικό αναγωγής) και τις συγκεντρώσεις των αντιδρώντων



## Δυναμικό οξειδοαναγωγής και ελεύθερη ενέργεια

Το παράδειγμα της αναπνευστικής αλυσίδας:

Μεταφορά  $e$  από το NADH στο  $H^+$



$$\Delta G^{0'} = -n F \Delta E'_{0} = -2 \times 23,06 \times 1,14 = -52,6 \text{ kcal/mol}$$

$(\Delta G < 0)$

Άρα αυτή η αντίδραση ευνοείται θερμοδυναμικά.

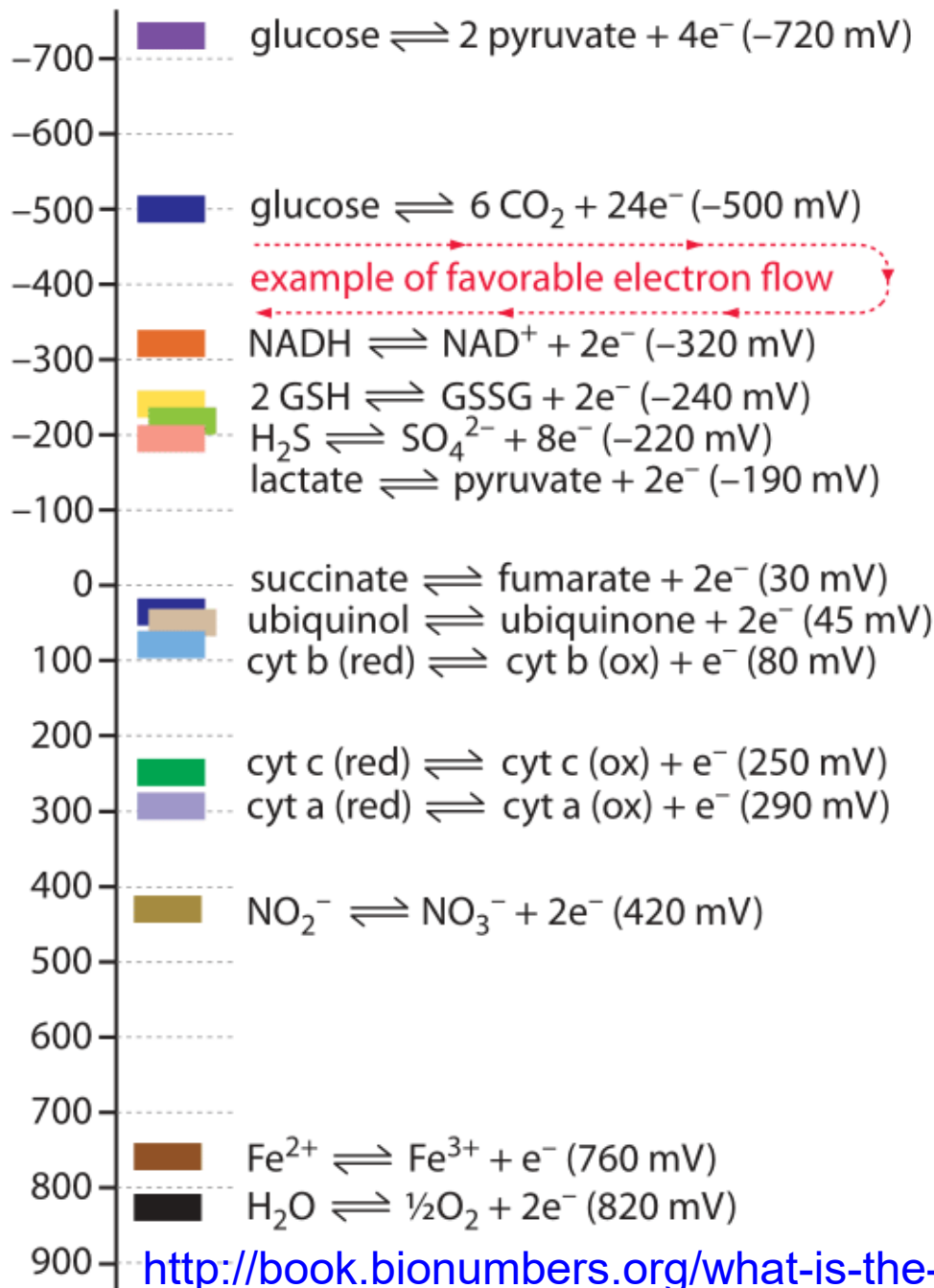
Γίνεται αυθόρμητα;

Redox potential [mV]

+810	aerobic respiration	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
+750	denitrification (nitrate reduction)	$NO_3 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow \frac{1}{2} N_2 + 3H_2O$
+510	mangane (IV) reduction	$MnO_2 + 4H^+ + 2e^- \rightarrow Mn^{2+} + 2H_2O$
+200	iron (III) reduction	$Fe(OH)_3 + 3H^+ + e^- \rightarrow Fe^{2+} + 3H_2O$
-220	sulphate (IV) reduction	$SO_4^{2-} + 10H^+ + 8e^- \rightarrow H_2S + 4H_2O$
-240	CO <sub>2</sub> reduction to methane (methanogenesis)	$CO_2 + 8H^+ + 8e^- \rightarrow CH_4 + 2H_2O$
-320		$NAD^+ + H^+ + 2e^- \rightarrow NADH$

Άρα η ροή ηλεκτρονίων από το **NADH** σε όλες τις παραπάνω ενώσεις ευνοείται θερμοδυναμικά

standard reduction potential  $E^{\circ}$  (mV)



Τα ηλεκτρόνια που δωρίζονται από τις ημιαντιδράσεις στο πάνω μέρος μπορούν να καταναλωθούν σε ημιαντιδράσεις χαμηλότερα ώστε να ολοκληρωθεί μια αντίδραση που ευνοείται θερμοδυναμικά.

**Table 8.4**

Electron acceptors used by *Bacteria* or *Archaea* during aerobic and anaerobic respiration. Some organisms that utilize these acceptors are presented

	Terminal Electron Acceptor	Typical Product	Microorganism
<b>Aerobic</b>	<u>O<sub>2</sub></u>	H <sub>2</sub> O	<i>Micrococcus luteus</i>
<b>Anaerobic</b>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	H <sub>2</sub> S	<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>
	Fe <sup>3+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	<i>Geobacter metallireducens</i>
	Mn <sup>4+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	<i>Desulphuromonas acetoxidans</i>
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<i>Escherichia coli</i>
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N <sub>2</sub>	<i>Thiobacillus denitrificans</i>
	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	<i>Methanosarcina barkeri</i>
	CO <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>	<i>Clostridium aceticum</i>
	S <sup>0</sup>	H <sub>2</sub> S	<i>Desulphuromonas acetoxidans</i>
	AsO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	AsO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	<i>Chrysiogenes arsenatis</i>
	Fumarate	Succinate	<i>Wolinella succinogens</i>

## 2.6.2. Αναγωγή νιτρικών

- Οι ανόργανες ενώσεις αζώτου είναι οι πιο συνηθισμένοι αποδέκτες ηλεκτρονίων κατά την αναεροβική αναπνοή

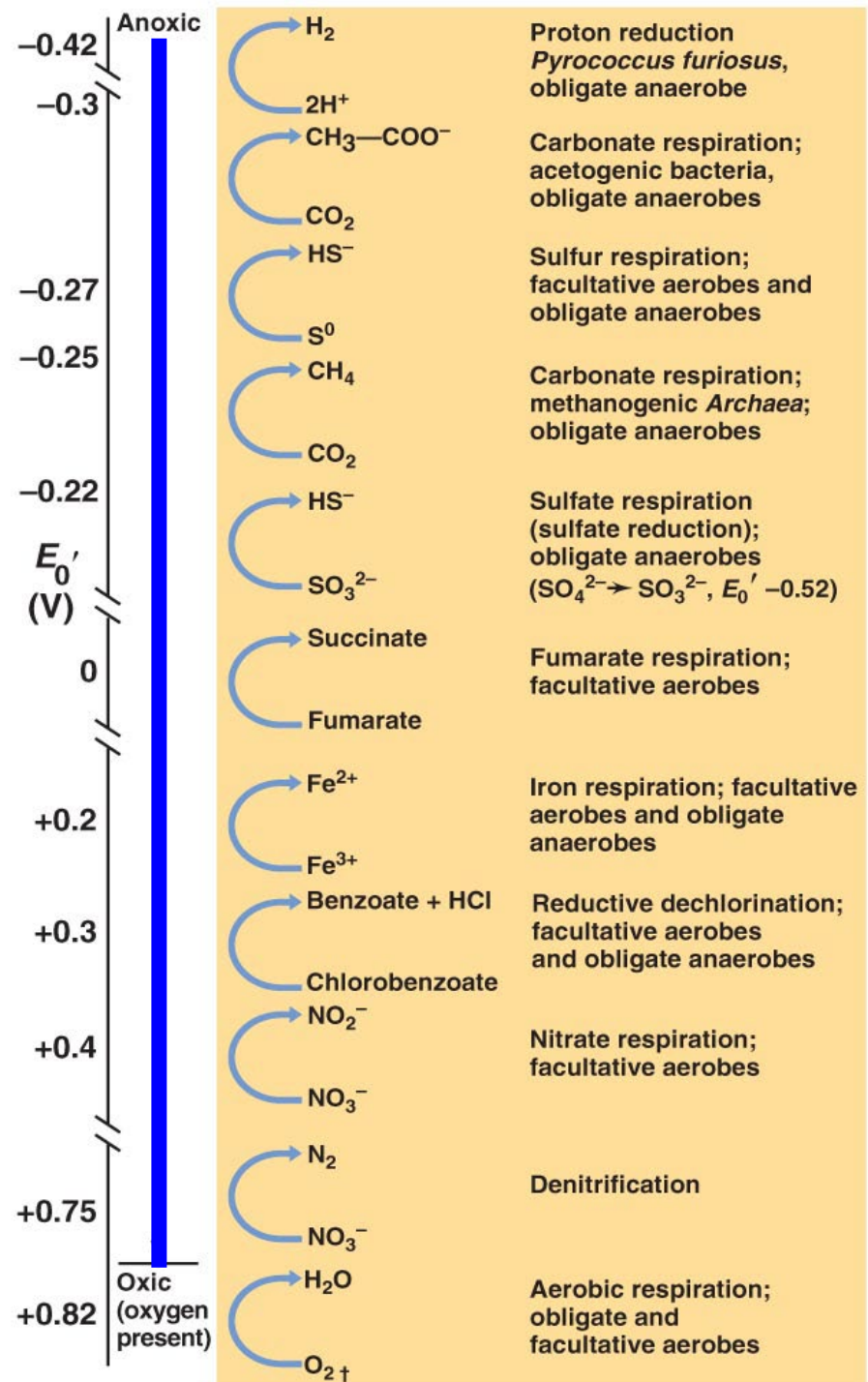
**Table 21.4** Oxidation states of key nitrogen compounds

<i>Compound</i>	<i>Oxidation state of N atom</i>
Organic N ( $-\text{NH}_2$ )	-3
Ammonia ( $\text{NH}_3$ )	-3
Nitrogen gas ( $\text{N}_2$ )	0
Nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ )	+1 (average per N)
Nitrogen oxide ( $\text{NO}$ )	+2
Nitrite ( $\text{NO}_2^-$ )	+3
Nitrogen dioxide ( $\text{NO}_2$ )	+4
Nitrate ( $\text{NO}_3^-$ )	+5

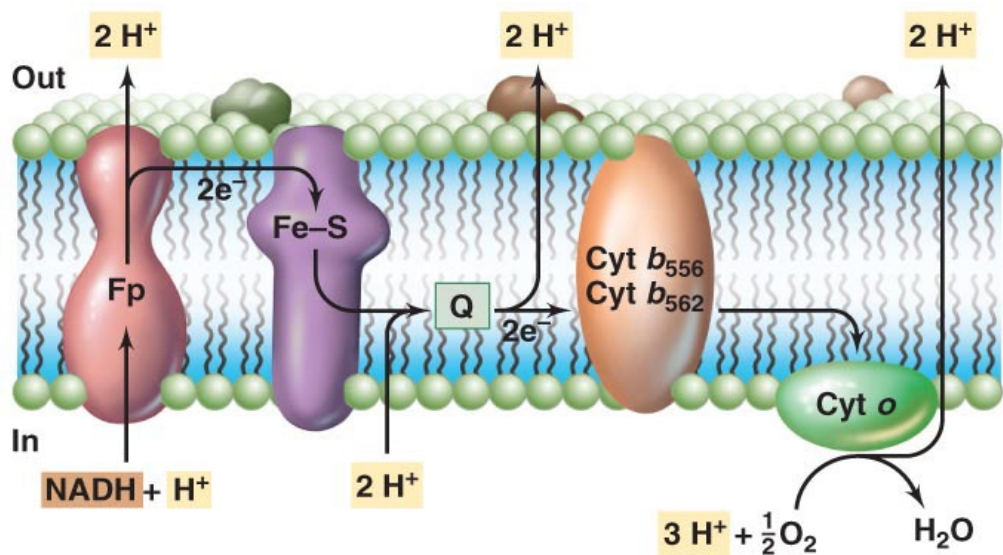
- Τα  $\text{NO}_3^-$  είναι οι συνήθεις αποδέκτες ηλεκτρονίων

# Κύριοι τύποι Αναεροβικής αναπνοής

Με **μπλε** το εύρος δυναμικών των οξειδοαναγωγικών ζευγών για τα οποία μπορεί να υπάρξει ροή ηλεκτρονίων χωρίς την παρουσία οξυγόνου.

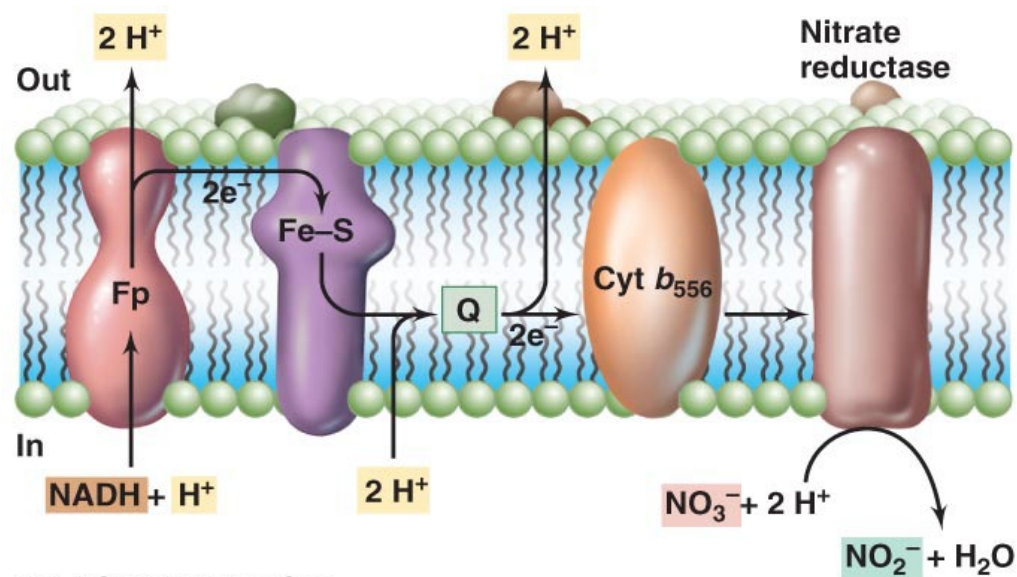


# Αεροβική και αναεροβική αναπνοή (*E. coli*)



+O<sub>2</sub>

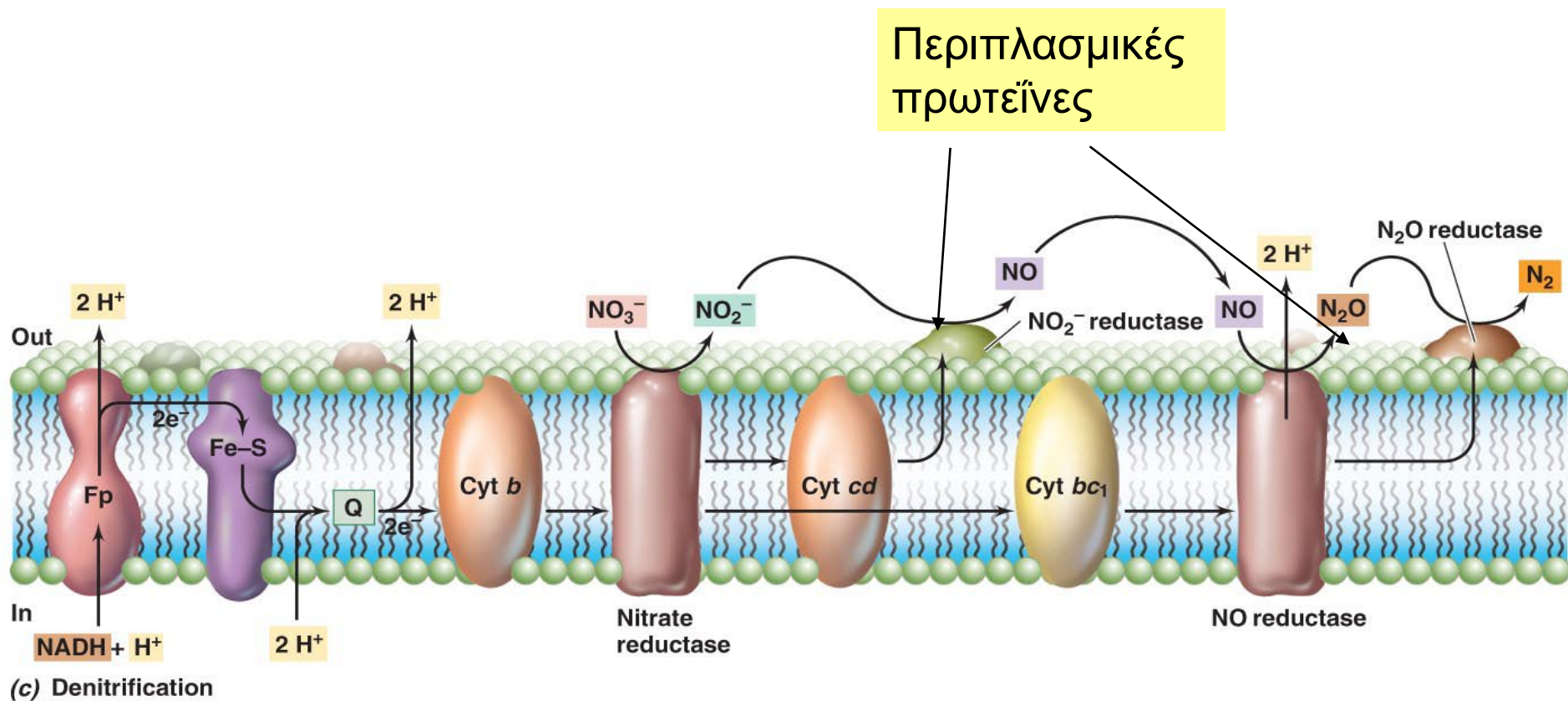
(a) Aerobic respiration



-O<sub>2</sub>

(b) Nitrate reduction

# Αναεροβική αναπνοή (*Pseudomonas stutzeri*)





Αναεροβική αναπνοή, συνέχεια...

## 2.6.3. Αναγωγή θειικών ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) και θείου

- Πολλές ανόργανες ενώσεις του θείου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αποδέκτες ηλεκτρονίων στην αναερόβια αναπνοή

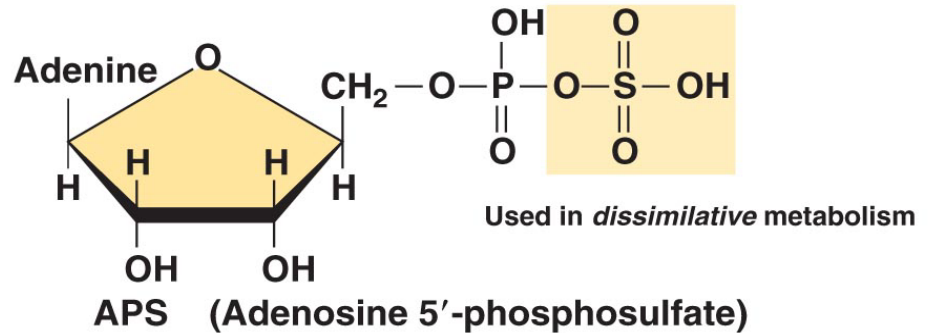
Διαφορετικές ενώσεις μπορούν να δώσουν ηλεκτρόνια για την αναγωγή των θειικών π.χ.  $\text{H}_2$ , οργανικές ενώσεις, φωσφορώδη ( $\text{PO}_3^{3-}$ )

**Table 21.5** Sulfur compounds and electron donors for sulfate reduction

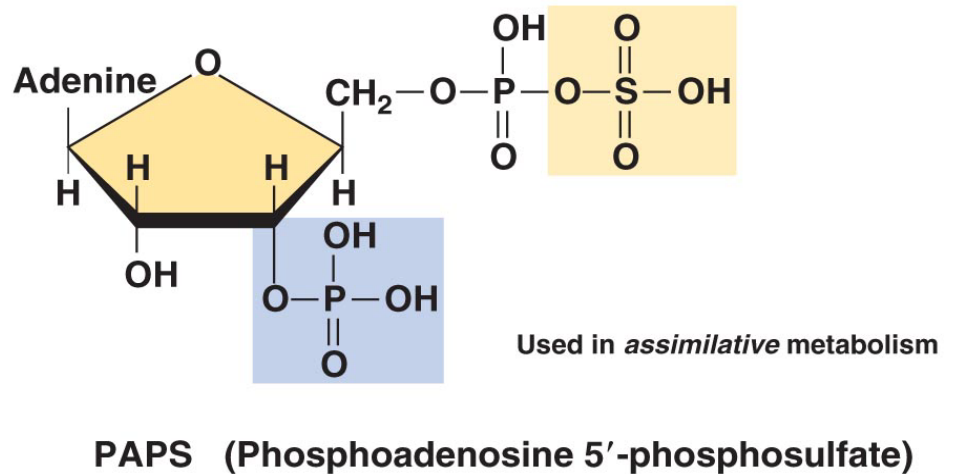
<i>Compound</i>	<i>Oxidation state of S atom</i>
<b>Oxidation states of key sulfur compounds</b>	
Organic S (R—SH)	-2
Sulfide ( $\text{H}_2\text{S}$ )	-2
Elemental sulfur ( $\text{S}^0$ )	0
Thiosulfate ( $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ )	+2 (average per S)
Sulfur dioxide ( $\text{SO}_2$ )	+4
Sulfite ( $\text{SO}_3^{2-}$ )	+4
Sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	+6
<b>Some electron donors used for sulfate reduction</b>	
$\text{H}_2$	Acetate
Lactate	Propionate
Pyruvate	Butyrate
Ethanol and other alcohols	Long-chain fatty acids
Fumarate	Benzoate
Malate	Indole
Choline	Various hydrocarbons

## Ενεργοποιημένα θειικά

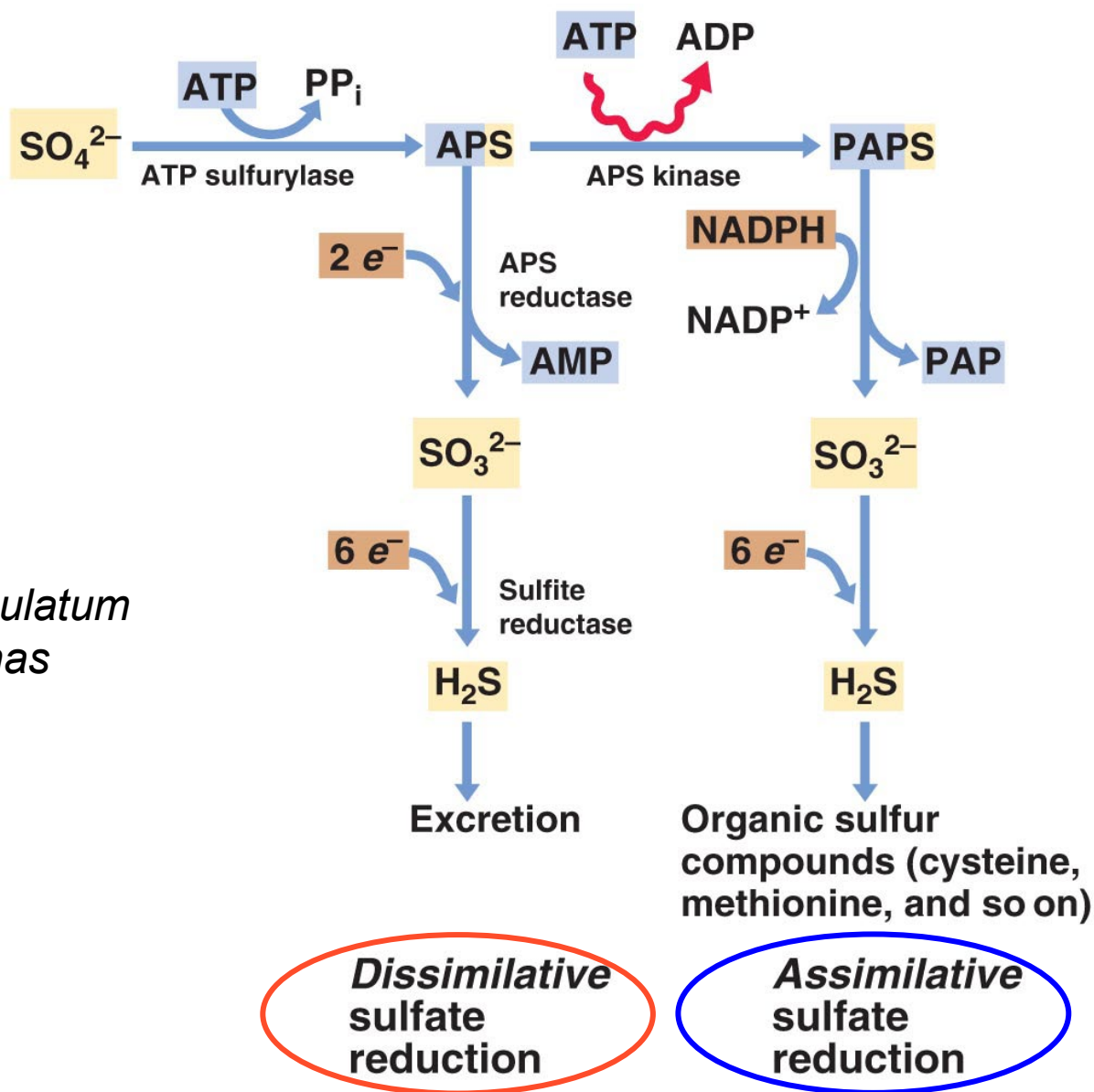
- Η αναγωγή του  $\text{SO}_4^{2-}$  σε  $\text{H}_2\text{S}$  προχωρά μέσα από διαφορετικά ενδιάμεσα



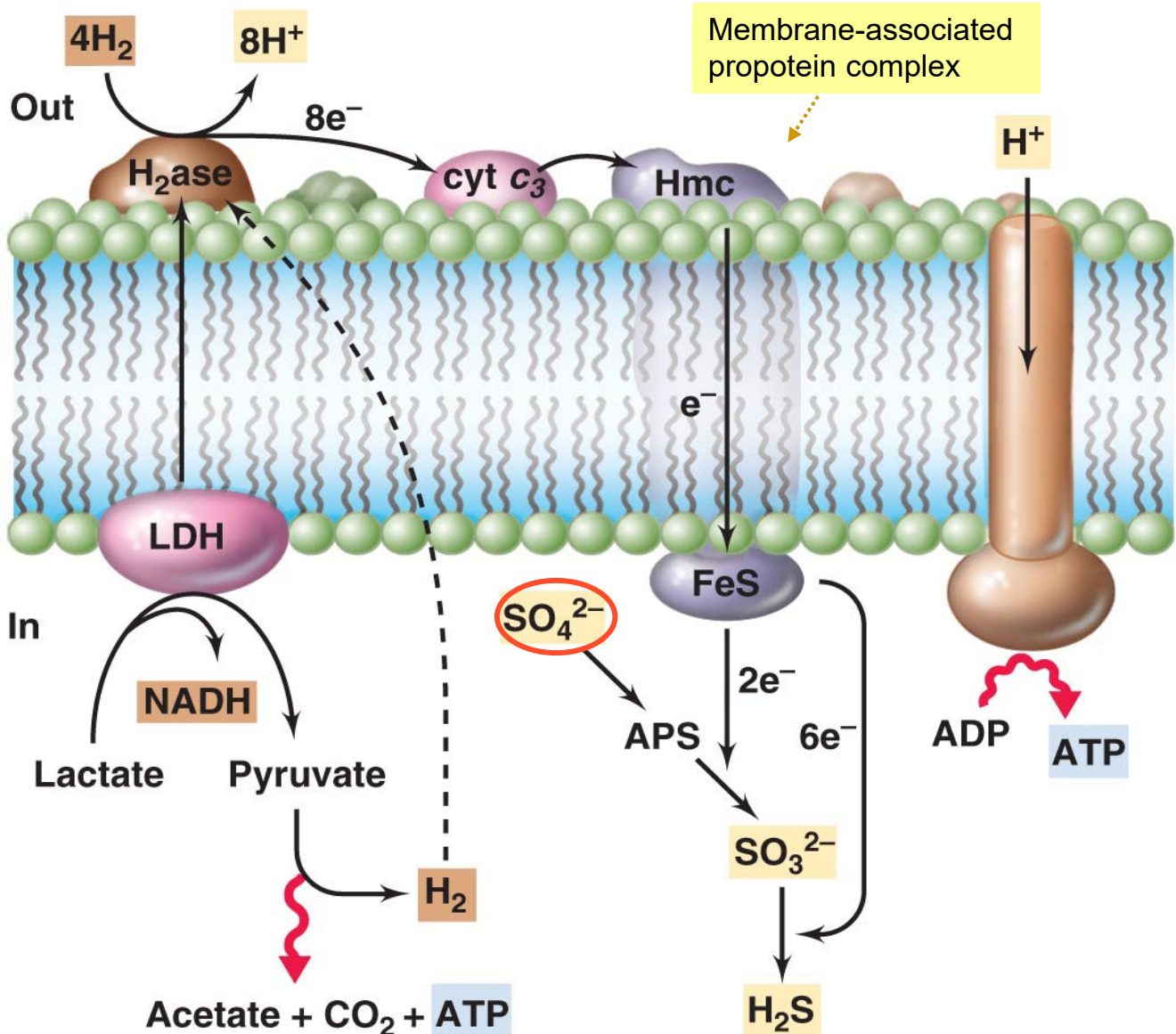
- Απαιτείται η ενεργοποίηση των θειικών



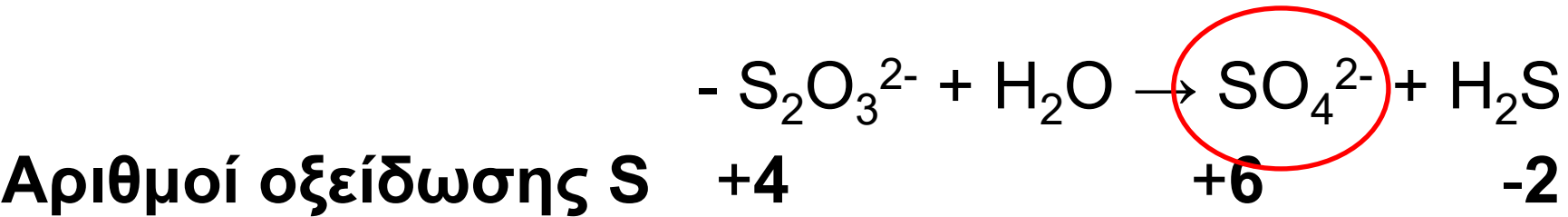
# Μη αφομοιωτική και αφομοιωτική αναγωγή θειικών $\text{SO}_4^{2-}$



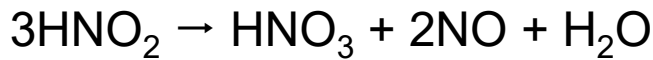
# Αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων κατά την αναγωγή των $\text{SO}_4^{2-}$



- Μερικά βακτήρια που ανάγουν το θείο μπορούν να κερδίσουν επιπλέον ενέργεια από την αυτοοξειδοαναγωγή ενώσεων θείου (π.χ. θειοθειϊκών)



Εδώ είναι οι περιπτώσεις των νιτρωδών, υπεροξειδίου:



## 2.6.4 Οξικογένεση

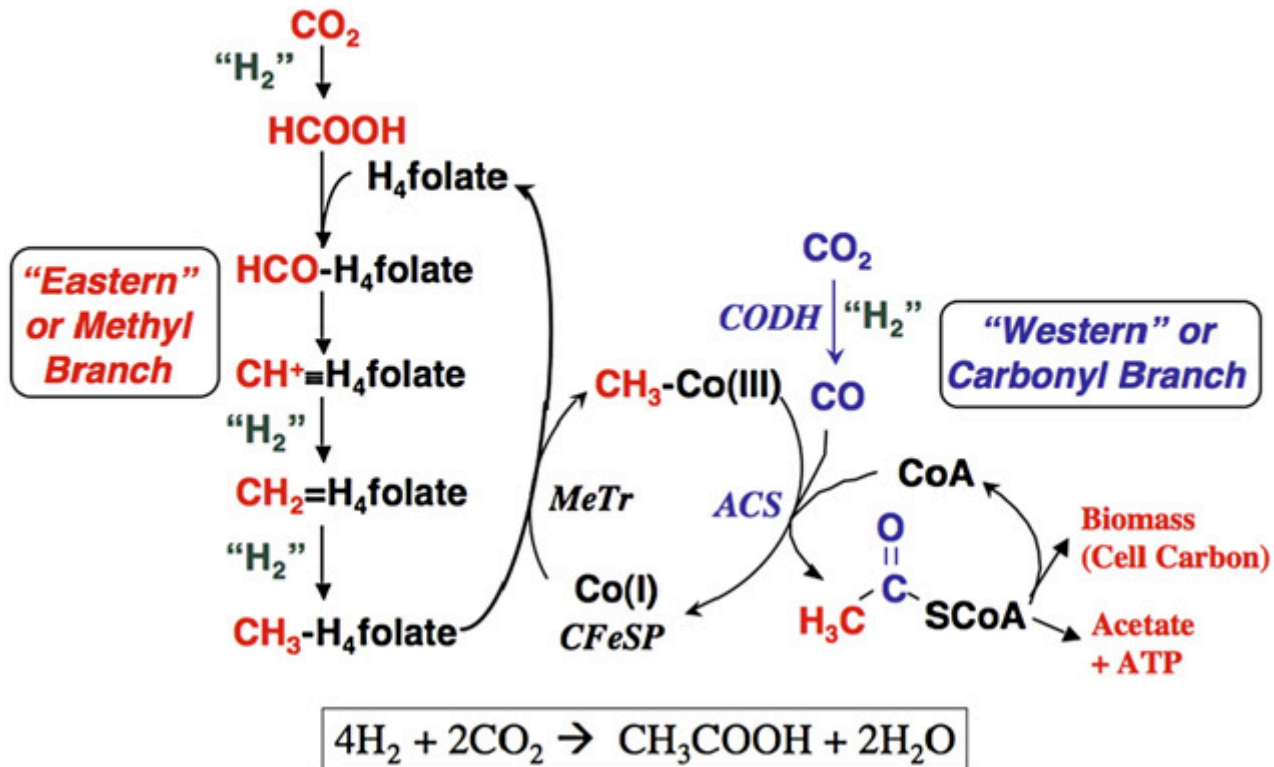
# Οξικογένεση, γενικά χαρακτηριστικά

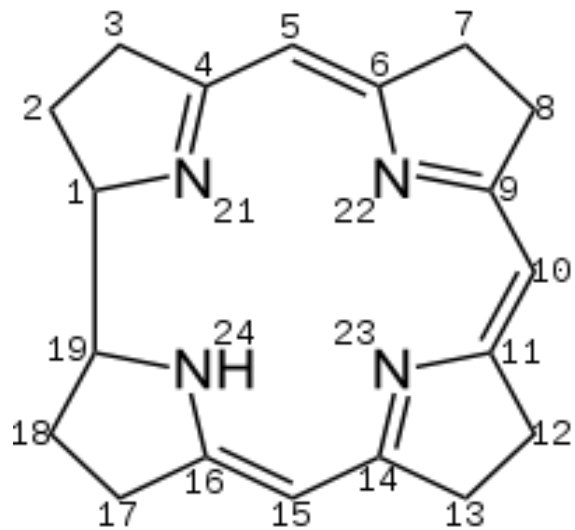
- Αναγωγή του (+4)  $\text{CO}_2$  σε (+3) **οξικό** μέσω της μεταβολικής οδού του ακέτυλο συνενζύμου Α.
- Δότης ηλεκτρονίων:  $\text{H}_2$  (κύριος).
- Αποδέκτης ηλεκτρονίων:  $\text{CO}_2$ .
- Βαθμιδωτή επιμήκυνση της ανθρακικής αλυσίδας ξεκινώντας από τον άνθρακα του  $\text{CO}_2$ .
- Προϊόντα, οξικό και ATP.

Αυτός ο δρόμος είναι ευρέως διαδεδομένος στα **υποχρεωτικά αναερόβια βακτήρια**.

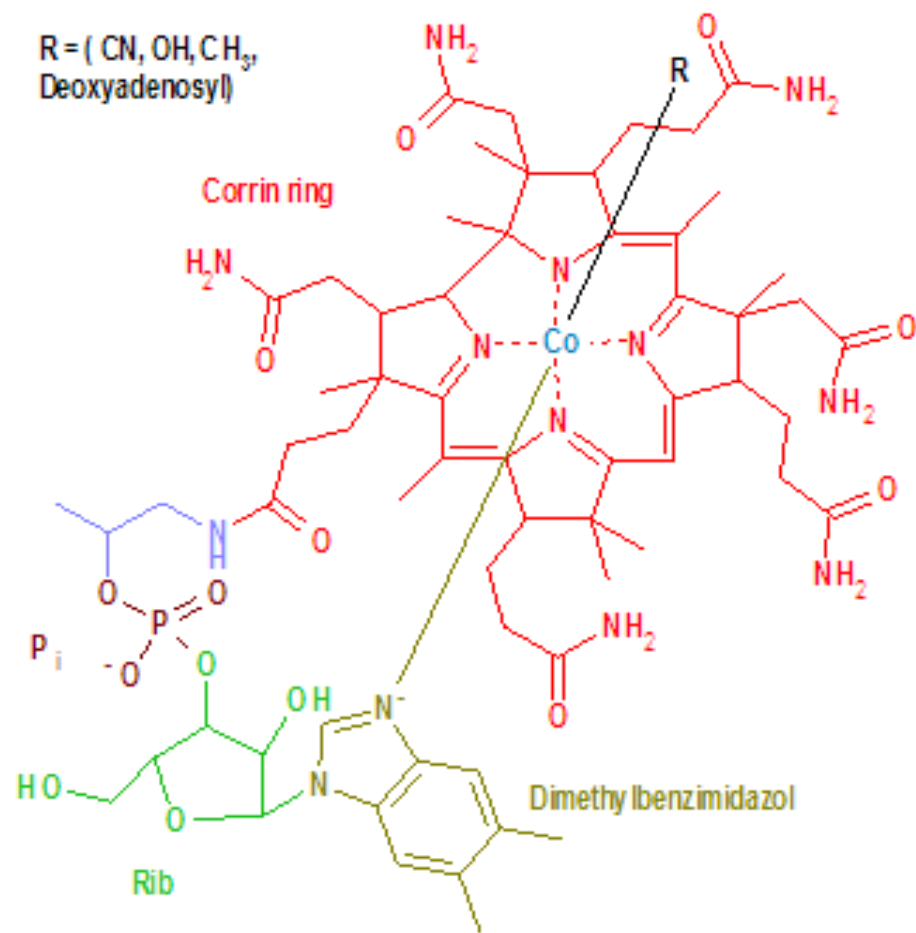


# The Wood-Ljungdahl Pathway



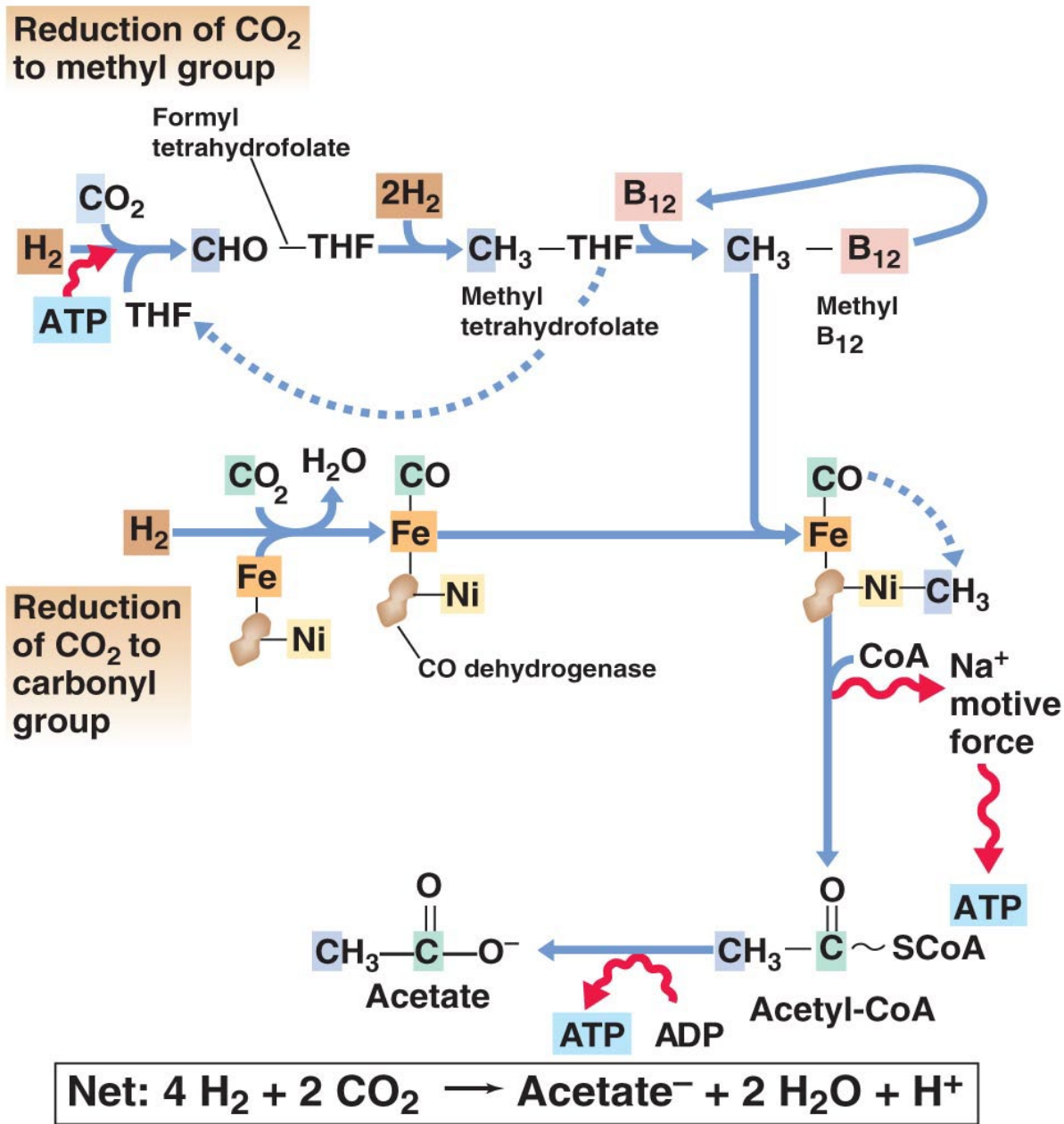


Δακτύλιος  
κορρίνης



Βιταμίνη B12  
(κυανοκοβαλαμίνη)

# Αντιδράσεις ακέτυλο-CoA μεταβολικής οδού



# Οργανισμοί που χρησιμοποιούν την οδό του ακέτυλο-CoA

**Table 21.6** Organisms employing the acetyl-CoA pathway of CO<sub>2</sub> fixation

I. Acetate synthesis, the result of energy metabolism

*Acetoanaerobium noterae*

*Acetobacterium woodii*

*Acetobacterium wieringae*

*Acetogenium kivui*

*Acetitomaculum ruminis*

*Clostridium aceticum*

*Clostridium formicaceticum*

*Moorella thermoacetica*

*Desulfotomaculum orientis*

*Sporomusa paucivorans*

*Eubacterium limosum* (also produces butyrate)

*Treponema primitia* (from termite hindguts)

## **Table 21.6** Organisms employing the acetyl-CoA pathway of CO<sub>2</sub> fixation

### **II. Acetate synthesis in autotrophic metabolism**

Autotrophic homoacetogenic bacteria

Autotrophic methanogens

Autotrophic sulfate-reducing bacteria

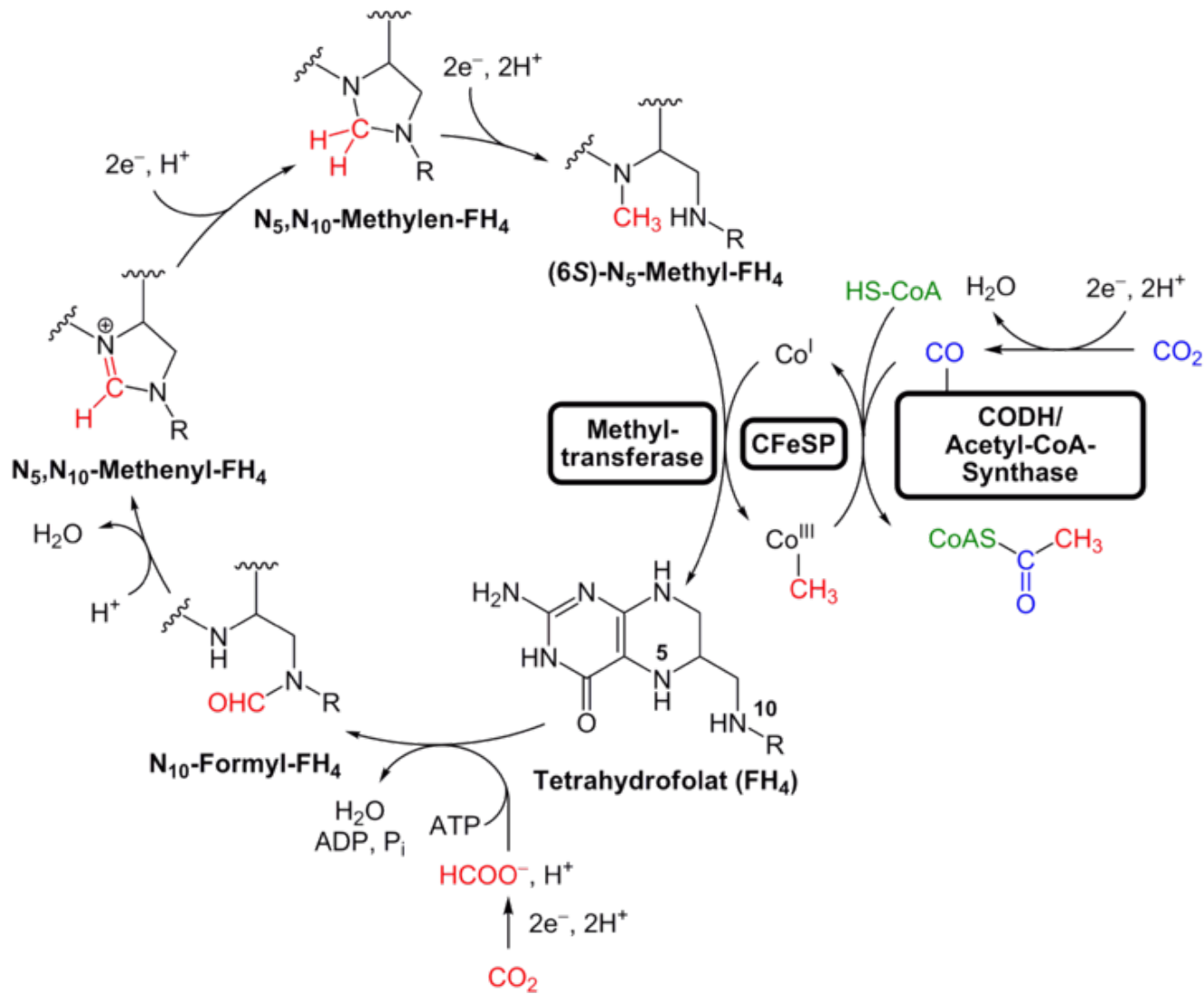
### **III. Acetate oxidation in energy metabolism**

Reaction: Acetate + 2 H<sub>2</sub>O → 2 CO<sub>2</sub> + 8 H

Group II sulfate reducers (other than *Desulfobacter*)

Reaction: Acetate → CO<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub>

Acetotrophic methanogens (*Methanosarcina*, *Methanosaeta*)



The **Wood-Ljungdahl pathway**: This pathway enables the use of hydrogen as an electron donor, and carbon dioxide as an electron acceptor and as a building block for biosynthesis.

[https://en.wikipedia.org/wiki/Wood%E2%80%93Ljungdahl\\_pathway](https://en.wikipedia.org/wiki/Wood%E2%80%93Ljungdahl_pathway)

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/98/Reduktiver\\_Acetyl-CoA-](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/98/Reduktiver_Acetyl-CoA-)

## 2.6.5. Μεθανογένεση

- **Μεθανογένεση:** παραγωγή μεθανίου από αναγωγή άλλων μορίων με δότη ηλεκτρονίων το υδρογόνο
  - Πολύπλοκη σειρά βιοχημικών αντιδράσεων με ιδιαίτερα **συνένζυμα μεθανογενέσεως** που καταλήγουν στην παραγωγή μεθανίου ( $\text{CH}_4$ )

# Μεθανογένεση, γενικά χαρακτηριστικά

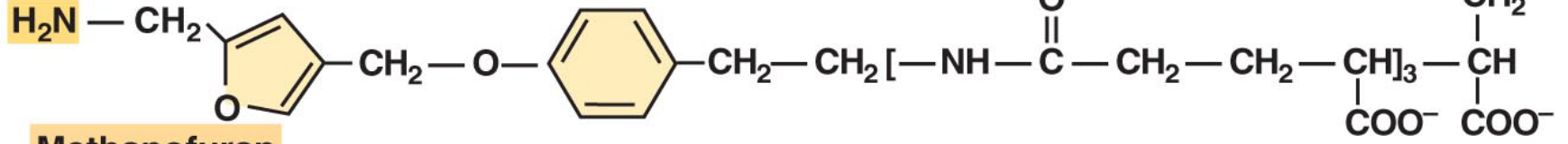
- Δότες ηλεκτρονίων στη μεθανογένεση:  $\text{H}_2$  (κύριος δότης), φορμικό οξύ,  $\text{CO}$ , οργανικές ενώσεις (επιπρόσθετοι δότες).
- Αποδέκτες ηλεκτρονίων:  $(+4)\text{CO}_2$ ,  $(-2)$ μεθανόλη,  $(+3)$ οξικό οξύ.

Προϊόν:  $(-4)\text{CH}_4$

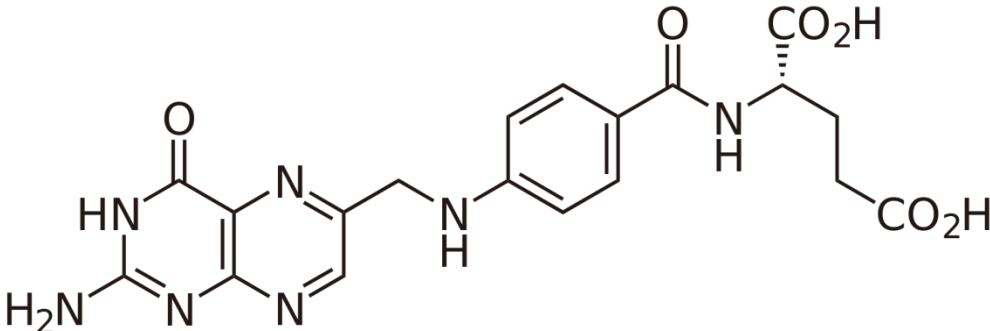
- **Συνένζυμα** **δεσμός**
- Μεθανοφουράνιο (MF)
- Μεθανοπτερίνη (MP)
- Συνένζυμο M (CoM) **S-C**
- Συνένζυμο  $\text{F}_{420}$  ( $\text{F}_{420}$ )
- Συνένζυμο  $\text{F}_{430}$  ( $\text{F}_{430}$ )
- Συνένζυμο B (CoB) **S-C**
- **Τελικό ένζυμο:** μέθυλο αναγωγή



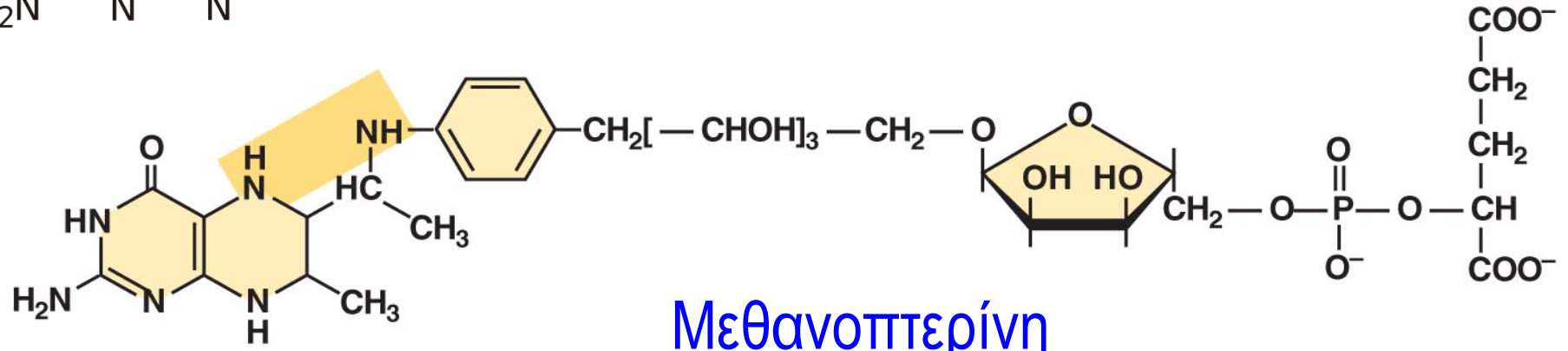
# Μεθανοφουράνιο



Methanofuran



φυλλικό οξύ



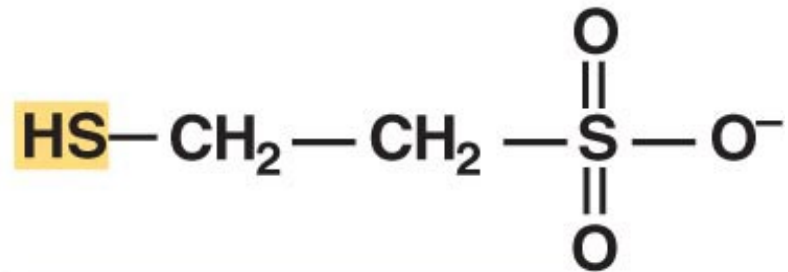
Μεθανοπτερίνη

Methanopterin

Μοιάζει στο φυλλικό οξύ

Ανάλογη λειτουργία με το THF

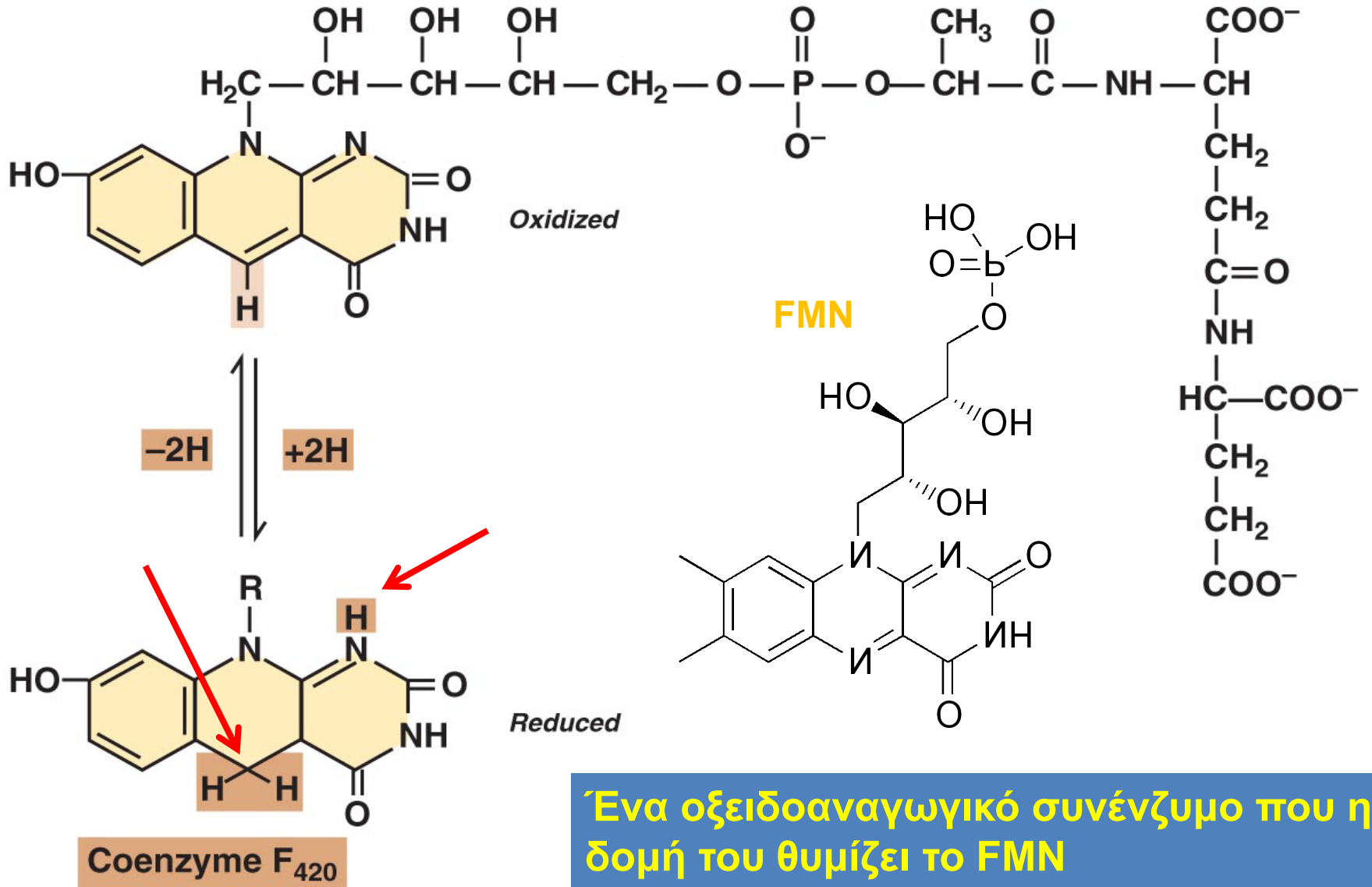
# Συνένζυμο M



Coenzyme M (CoM)

Απαιτείται για το τελικό στάδιο της μεθανογένεσης

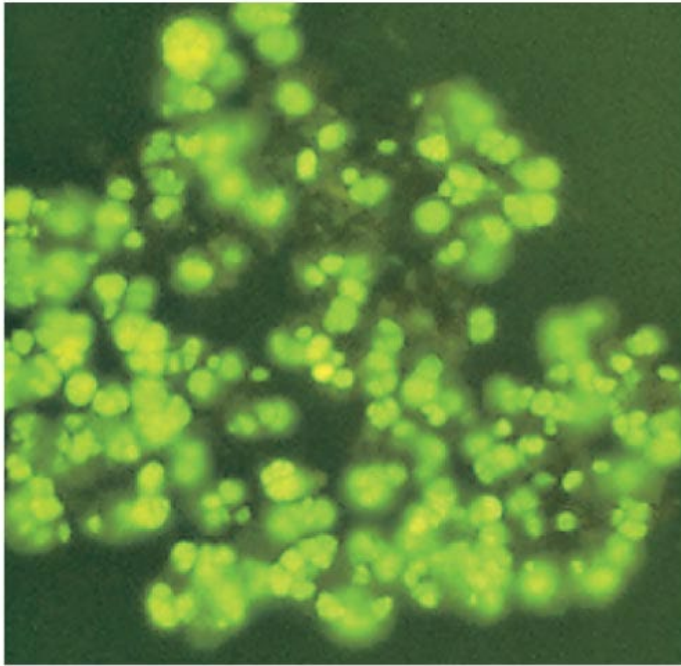
# Συνένζυμο F<sub>420</sub>



Ένα οξειδοαναγωγικό συνένζυμο που η δομή του θυμίζει το FMN

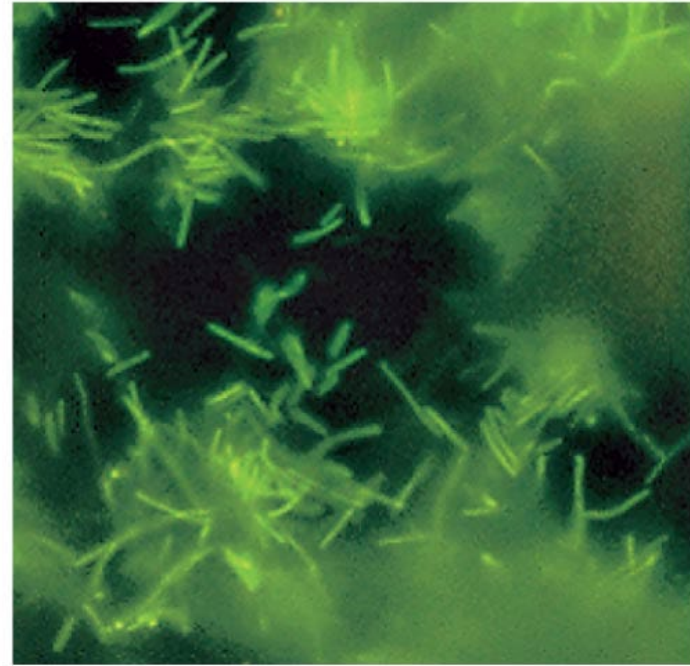
Η οξειδωμένη μορφή απορροφεί στα 420 nm και φθορίζει στο γαλαζοπράσινο

- Ο φθορισμός του **συνενζύμου F<sub>420</sub>** μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μικροσκοπική αναγνώριση των μεθανογόνων βακτηρίων



T. D. Brock

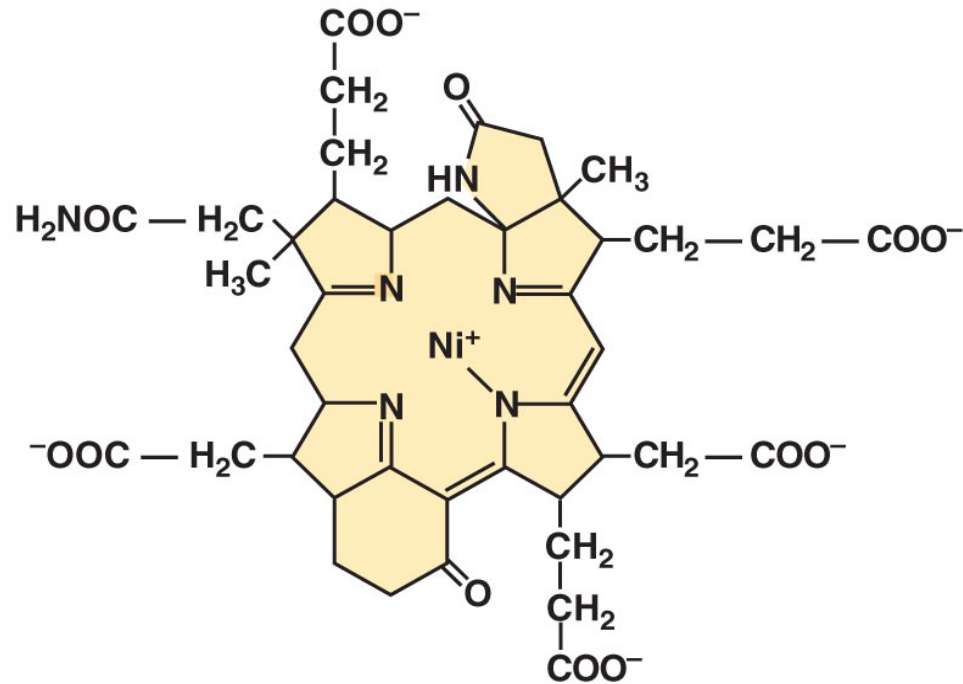
Φθορισμός του **συνενζύμου F<sub>420</sub>** του μεθανογόνου *Methanosarcina barkeri*



T. D. Brock

Φθορισμός του **συνενζύμου F<sub>420</sub>** του μεθανογόνου *Methanobacterium formicicum*

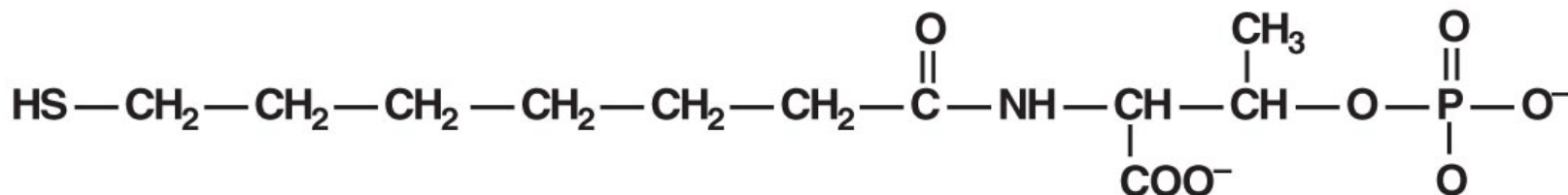
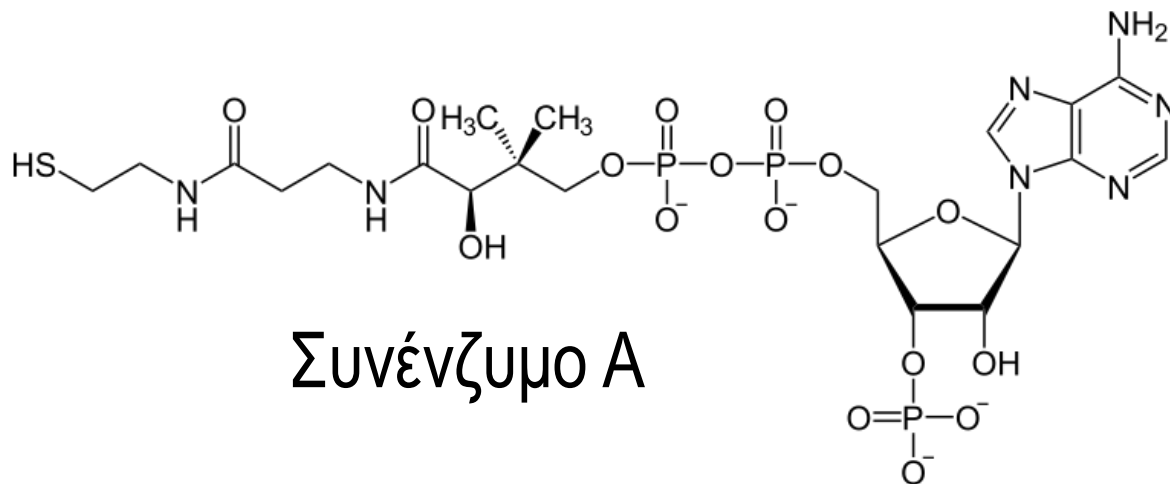
# Συνένζυμο F<sub>430</sub>



Coenzyme F<sub>430</sub>

Περιέχει νικέλιο και απαιτείται για το τελικό στάδιο της μεθανογένεσης

# Συνένζυμο Β



Coenzyme B (CoB)

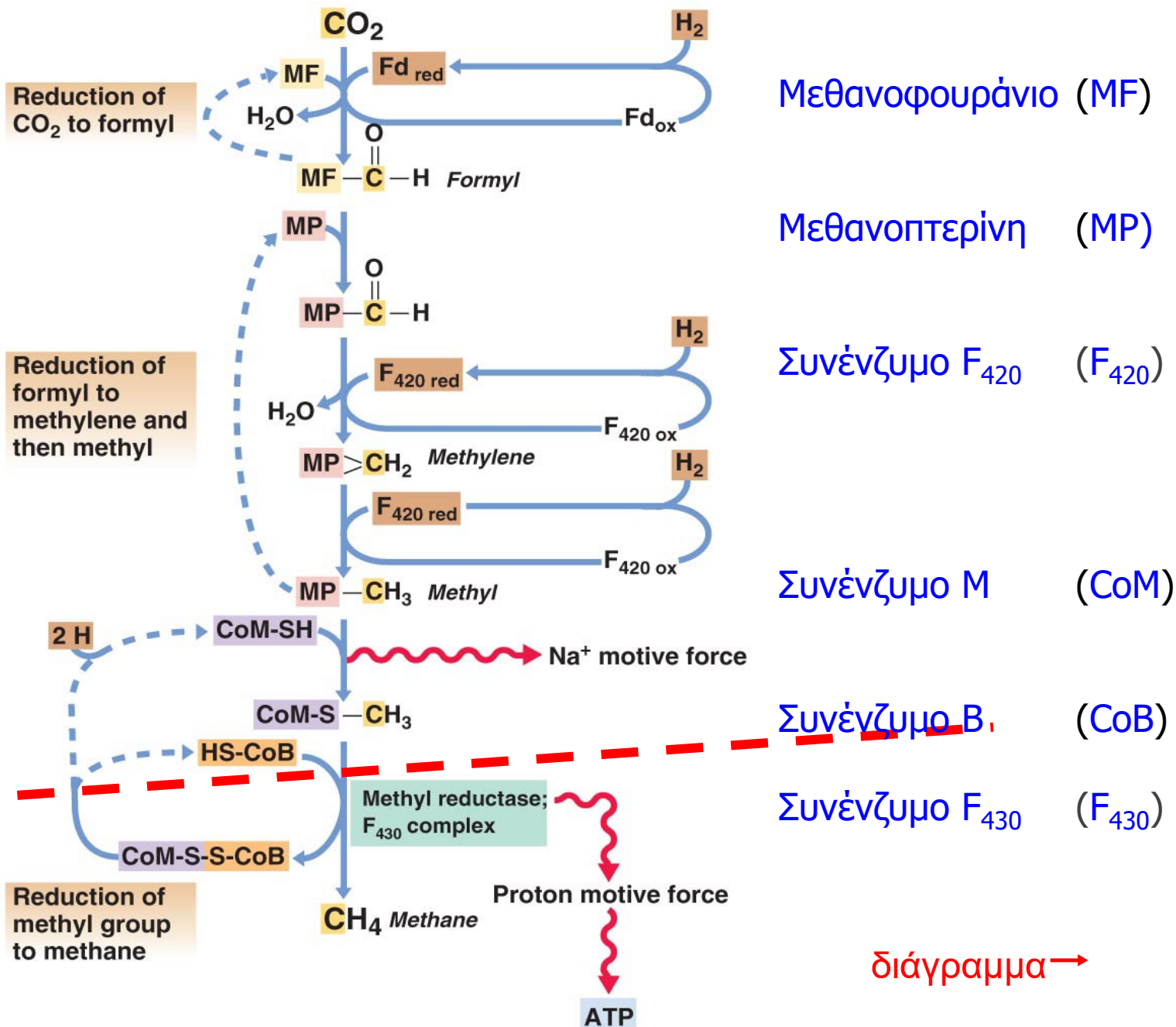
7-Μερκαπτο επτανοϋλ θρεόνινο φωσφορικό

Απαιτείται για το τελικό στάδιο της μεθανογένεσης που καταλύεται από το ενζυμικό σύμπλοκο της μέθυλο αναγωγίας

# Μεθανογένεση

από  $\text{CO}_2$  και

$\text{H}_2$



διάγραμμα →

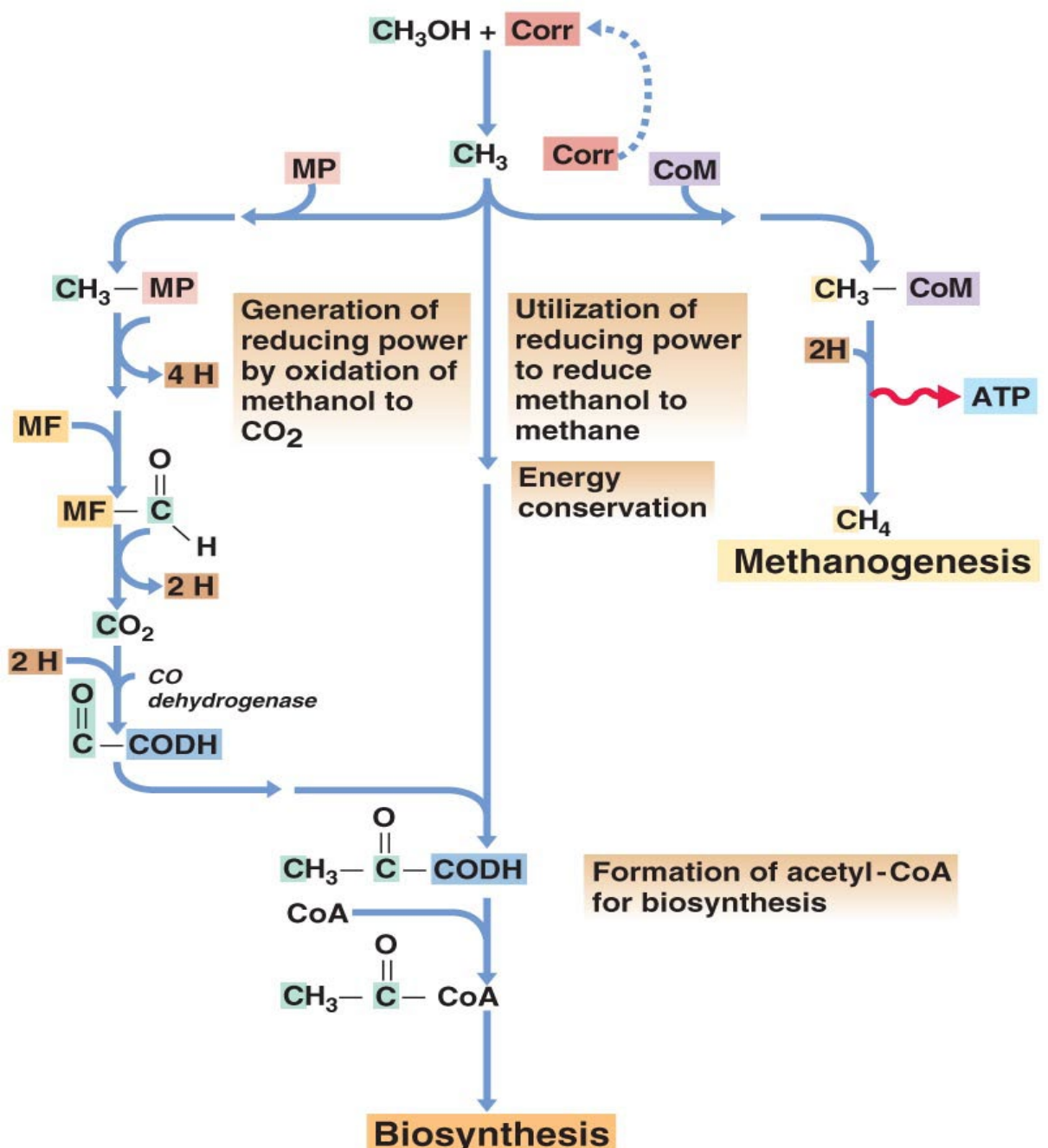
# Μεθανογένεση και αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων

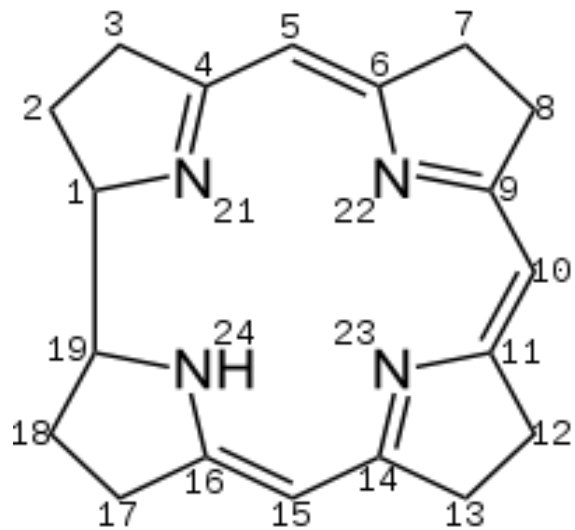




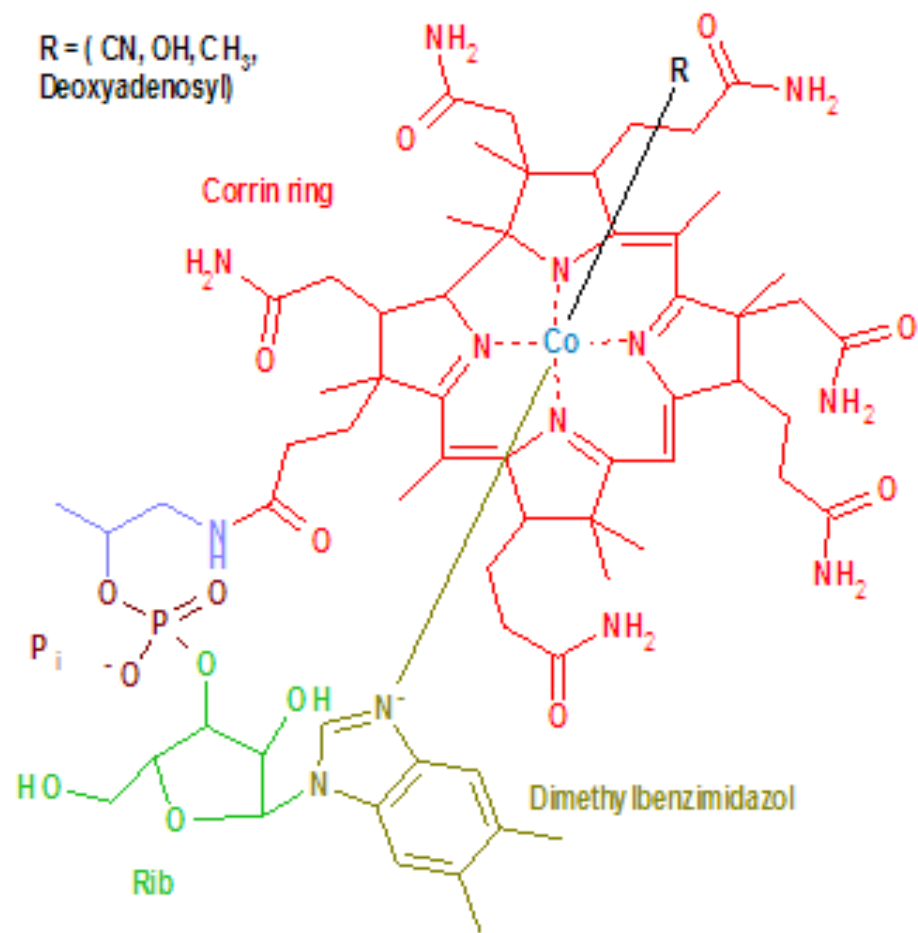
# Μεθανογένεση από Μεθανόλη

Δακτύλιος κορρίνης (Corr)  
 Μεθανοπερίνη (MP)  
 Συνένζυμο M (CoM)  
 Μεθανοφουράνιο (MF)  
 CO dehydrogenase (CODH)



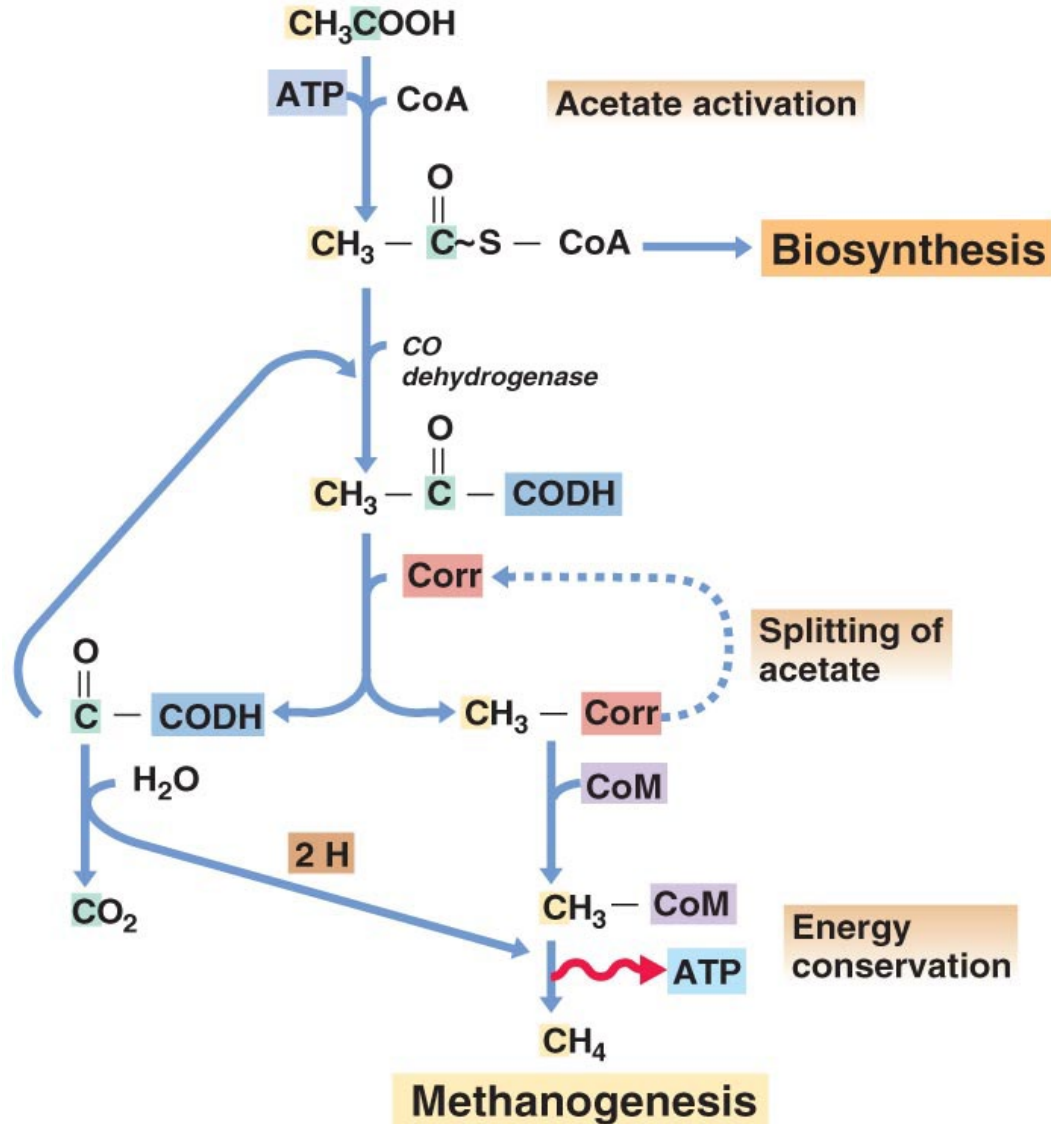


Δακτύλιος  
κορρίνης



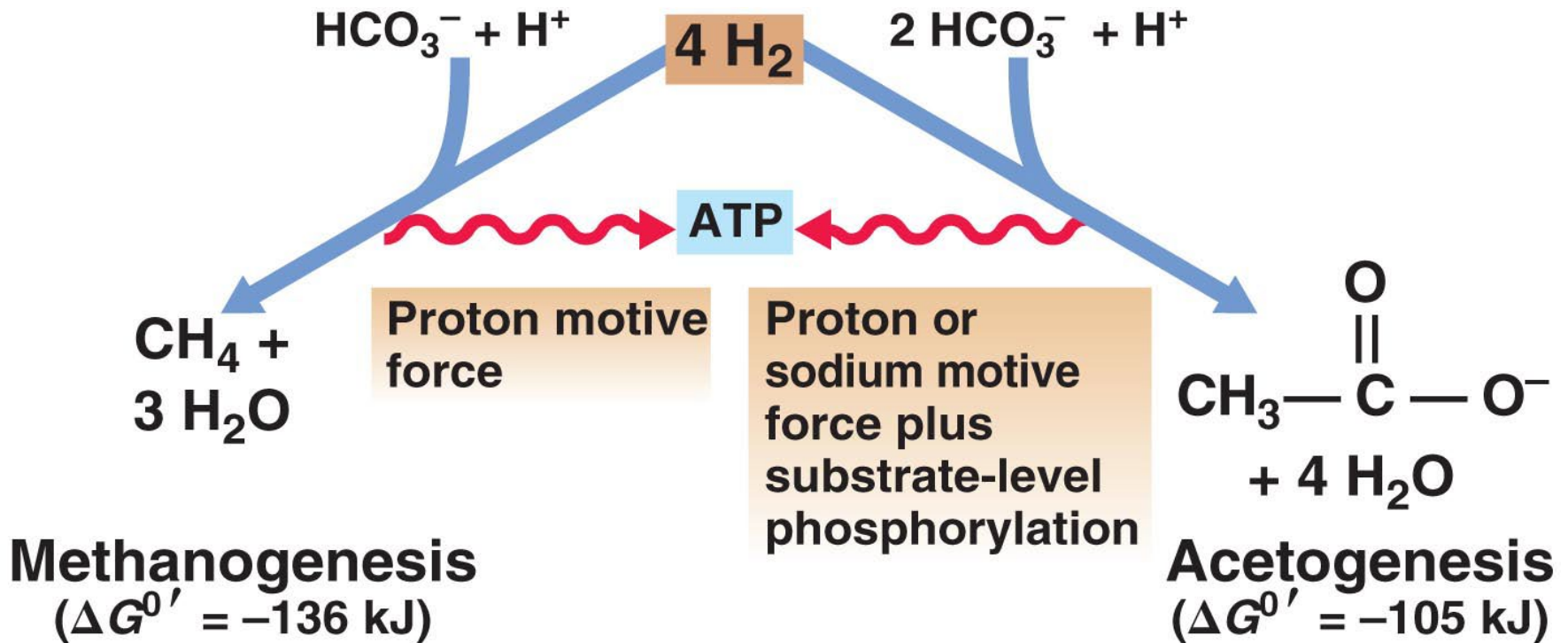
Βιταμίνη B12  
(κυανοκοβαλαμίνη)

# Μεθανογένεση από οξικό οξύ



- Η αυτοτροφία στα μεθανογόνα βακτήρια εξασφαλίζεται από το μεταβολικό δρόμο του **ακέτυλο-CoA**
- Η παραγωγή ενέργειας συνδέεται με χημειώσμωση από πρωτόνια, αλλά και ιόντα νατρίου

# Μεθανογένεση και Οξικογένεση



## 2.6.6. Αναγωγή πρωτονίων

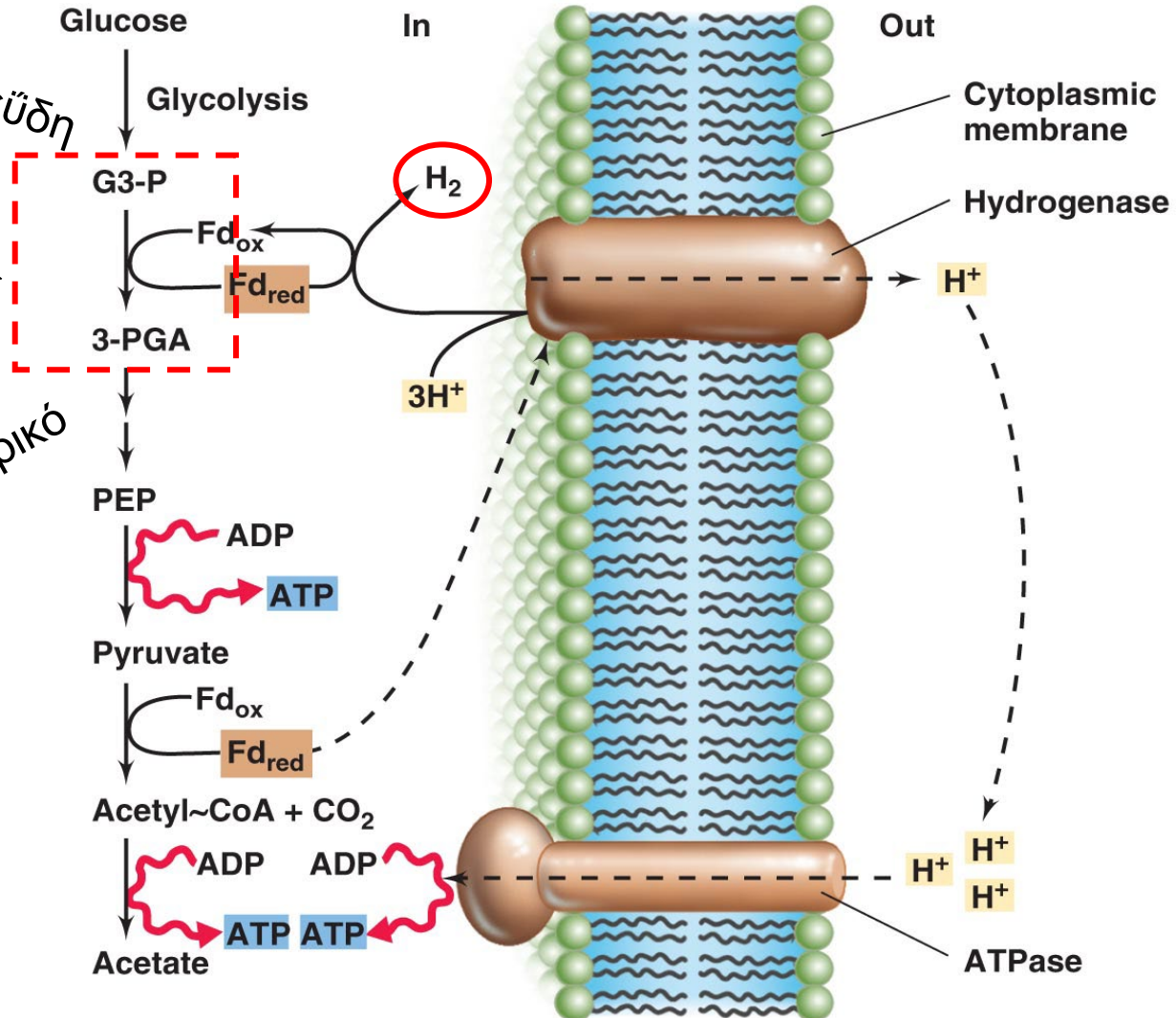
- *Pyrococcus furiosus*
  - Μέλος των αρχαίων
  - Μεγαλώνει βέλτιστα στους 100 °C.
  - Ίσως έχει τον απλούστερο από τους αναεροβικούς μηχανισμούς αναπνοής
  - Ο οργανισμός ζυμώνει τη γλυκόζη με αναγωγή πρωτονίων. Υπάρχει ATP συνθετάση, αλλά δεν υπάρχει αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων
  - Δότες ηλεκτρονίων: σάκχαρα και μικρά πεπτίδια
  - Αποδέκτης ηλεκτρονίων:  $H^+$ , αναγωγή σε  $H_2$

# Τροποποιημένη γλυκόλυση και αναγωγή H<sup>+</sup> στον *P. furiosus*

G3-P: 3-φωσφο γλυκεραλδεΐδη  
 Αναγωγή μέσω φερεδοξίνης

$Fd_{ox/red} = \sim -0.42 V$   
 $2H^+/H_2 = \sim -0.42 V$

3-PGA: 3-φωσφο γλυκερικό



## 2.6.7. Άλλοι αποδέκτες ηλεκτρονίων

- Τα  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{4+}$ ,  $\text{ClO}_3^-$ , και διάφορες οργανικές ενώσεις μπορούν να δράσουν ως αποδέκτες ηλεκτρονίων στα βακτήρια.
- Το  $\text{Fe}^{3+}$  είναι άφθονο στη φύση και η αναεροβική αναγωγή του χρησιμοποιείται από πολλούς οργανισμούς για παραγωγή ενέργειας.



# Άλλοι αποδέκτες ηλεκτρονίων

$$\Delta G = -nF\Delta E$$

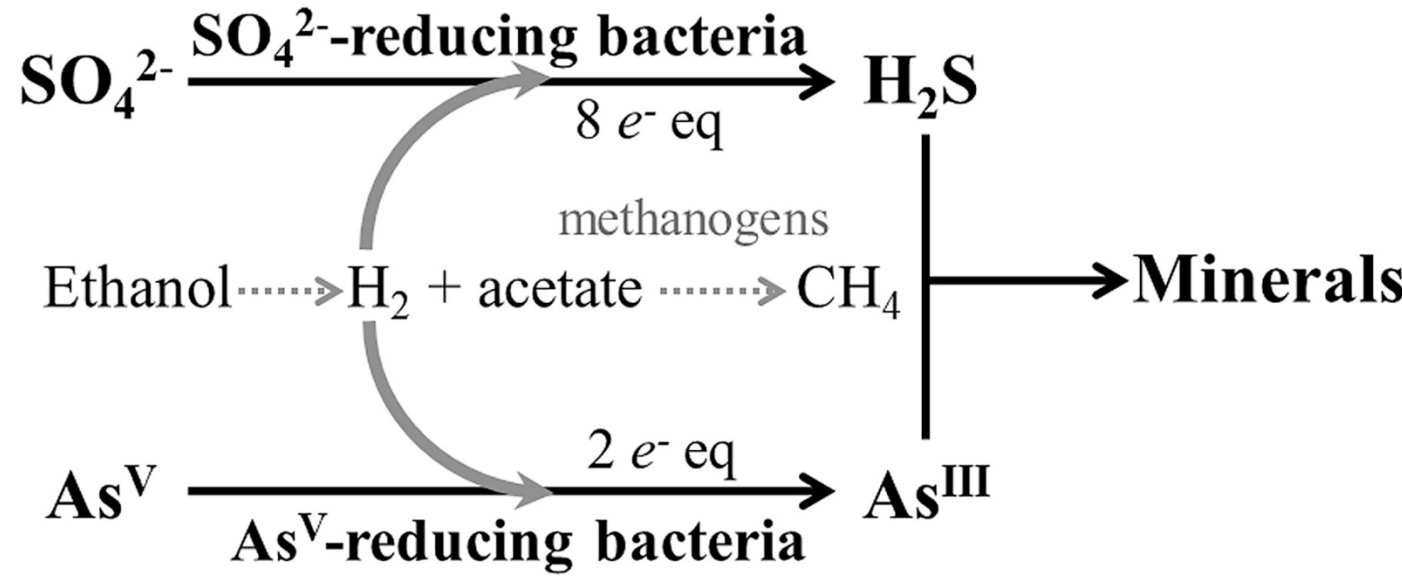
Couple	Reaction	$E_0'$
Fumarate/ Succinate	$\begin{array}{c} \text{O} \quad \text{H} \quad \text{O} \quad \text{O} \\ \parallel \quad   \quad \parallel \quad \parallel \\ -\text{O}-\text{C}-\text{C}=\text{C}-\text{C}-\text{O}^- \xrightarrow{2\text{H}} \text{O} \quad \text{O} \\ \parallel \quad \parallel \\ \text{O} \quad \text{O} \\   \quad   \\ \text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{C}-\text{O}^- \end{array}$	+0.03
Trimethylamine- <i>N</i> -oxide (TMAO)/ Trimethylamine (TMA)	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{H}_3\text{C}-\text{N}-\text{CH}_3 \\   \\ \text{O} \end{array} \xrightarrow{2\text{H}} (\text{CH}_3)_3\text{N} + \text{H}_2\text{O}$	+0.13
<b>Arsenate/ Arsenite</b>	$\begin{array}{c} \text{O}^- \\   \\ -\text{O}-\text{As}=\text{O} \\   \\ \text{O}^- \end{array} \xrightarrow{2\text{H}} \begin{array}{c} \text{O}^- \\   \\ \text{As}-\text{O}^- \\   \\ \text{O}^- \end{array} + \text{H}_2\text{O}$	+0.14
Dimethyl sulfoxide (DMSO)/ Dimethyl sulfide (DMS)	$\begin{array}{c} \text{O} \\   \\ \text{H}_3\text{C}-\text{S}-\text{CH}_3 \\   \\ \text{O} \end{array} \xrightarrow{2\text{H}} (\text{CH}_3)_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}$	+0.16
Ferric ion/ Ferrous ion	$\text{Fe}^{3+} \xrightarrow{e^-} \text{Fe}^{2+}$	+0.20
Selenate/ Selenite	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{O}-\text{Se}-\text{O}^- \\ \parallel \\ \text{O} \end{array} \xrightarrow{2\text{H}} \begin{array}{c} \text{O}^- \\   \\ \text{Se}=\text{O} \\   \\ \text{O}^- \end{array} + \text{H}_2\text{O}$	+0.48
Manganic ion/ Manganous ion	$\text{Mn}^{4+} \xrightarrow{2e^-} \text{Mn}^{2+}$	+0.80
Chlorate/ Chloride	$\text{ClO}_3^- \xrightarrow{6\text{H}} \text{Cl}^- + 3\text{H}_2\text{O}$	+1.00

ΤΟΞΙΚΟ

Arsenate/  
Arsenite

## 2.6.8. Συνδυαστική οξείδωση και αναγωγή από βιοκοινότητες

# 2.6.8.1 Βιοορυκτοποίηση κατά την αναγωγή των $\text{AsO}_4^{3-}$ , $\text{As}^{\text{V}}$ από βιοκοινότητες



<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135414005831>

## 2.6.8.1 Βιοορυκτοποίηση κατά την αναγωγή των $\text{AsO}_4^{3-}$ , $\text{As}^{\text{VI}}$ από βιοκοινότητες

- Η ιδιότητα των βακτηρίων να ανάγουν τα θειικά ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), έχει χρησιμοποιηθεί για τον καθαρισμό των αρσενικών ( $\text{AsO}_4^{3-}$ ,  $\text{As}^{\text{VI}}$ ) από τοξικά κατάλοιπα και μολυσμένο νερό.
  - Παραγωγή  $\text{As}_2\text{S}_3$  (τρисуλφίδιο του As, αδιάλυτο) κατά την αναγωγή των  $\text{As}^{\text{VI}}$  σε  $\text{As}^{\text{III}}$  ταυτόχρονα με την αναγωγή θειικών ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).



Μετά τον  
εμβολιασμό

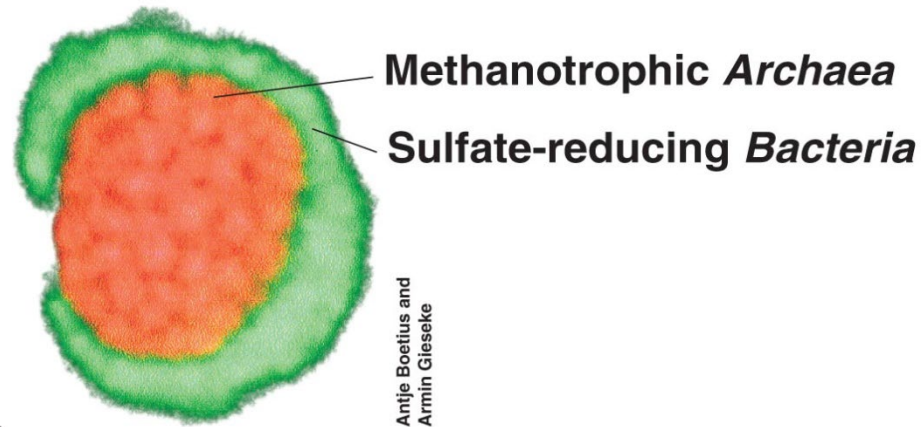
Συνθετικό  
 $\text{As}_2\text{S}_3$

Βιοορυκτοποίηση μετά  
από 2 εβδομάδες

Dianne K. Newman and Stephen Tay

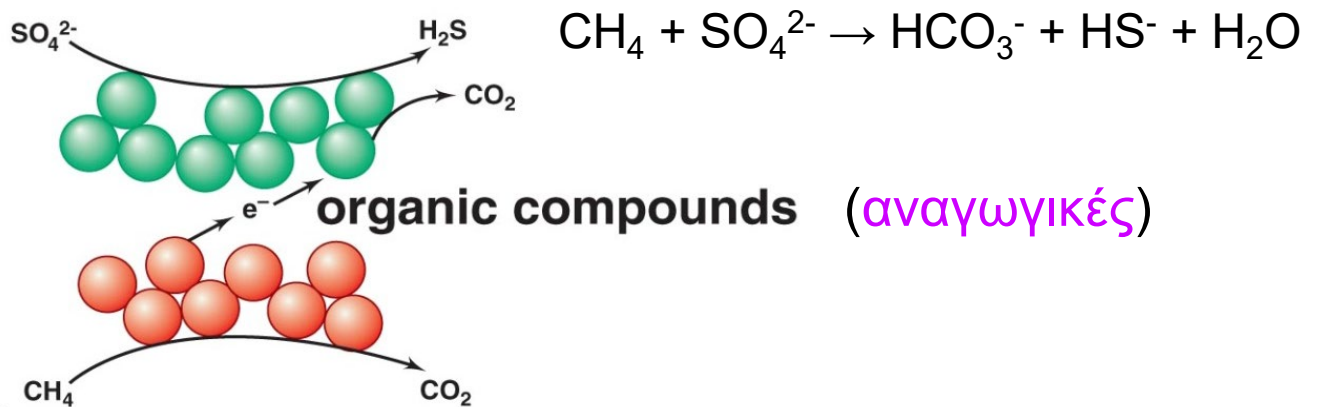
## 2.6.8.2 Ανοξική οξείδωση του μεθανίου σε CO<sub>2</sub> από **βιοκοινότητες**

- Μεθάνιο (CH<sub>4</sub>)
  - Ο απλούστερος υδρογονάνθρακας
  - Μπορεί να οξειδωθεί υπό αναερόβιες συνθήκες από κοινοπραξίες *μεθανοτροπικών αρχαίων και βακτηρίων που ανάγουν τα θειικά*
  - Τα αρχαία οξειδώνουν το CH<sub>4</sub> σε CO<sub>2</sub> **ενώ παράλληλα παράγουν μία αναγωγική οργανική ένωση**
  - Τα βακτήρια που ανάγουν τα θειικά (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) χρησιμοποιούν αυτή την οργανική ένωση για να πάρουν ηλεκτρόνια ώστε να ανάγουν το SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> σε H<sub>2</sub>S. Η αντίδραση αναγωγής στα αρχαία προχωράει και από την διαρροή ηλεκτρονίων στην αναγωγή των θειικών.
  - Η συνολική αντίδραση: CH<sub>4</sub> + SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> → HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> + HS<sup>-</sup> + H<sub>2</sub>O

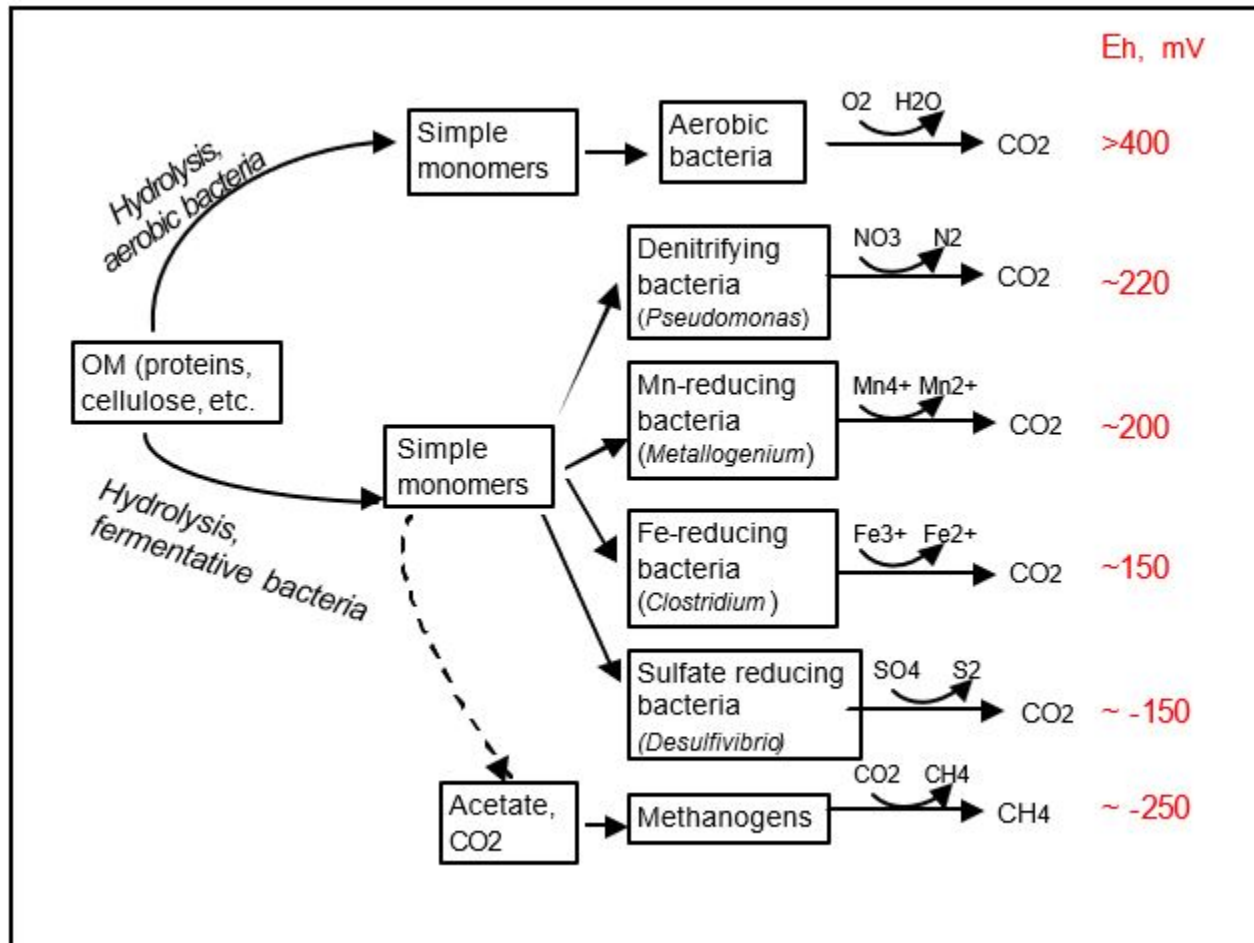


(a)

Συσσωματώματα κοινοπραξιών κυττάρων που οξειδώνουν το μεθάνιο



(b) Πιθανός μηχανισμός για τη συνεργατική αποικοδόμηση του μεθανίου



Ενεργειακά δυναμικά, τύπος αναπνοής και βακτηριακές ομάδες

## **2.7. Ο κύκλος του αζώτου**

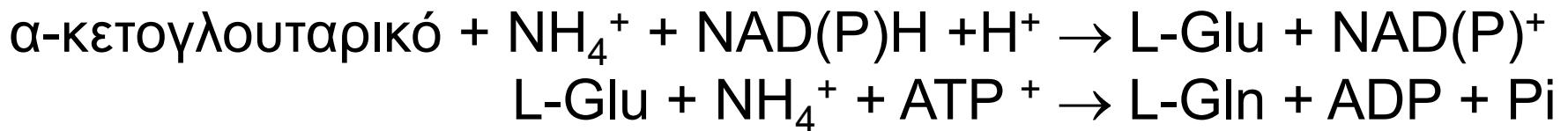


## 2.7. Ο κύκλος του αζώτου

### 2.7.1. Αμμωνιοποίηση:

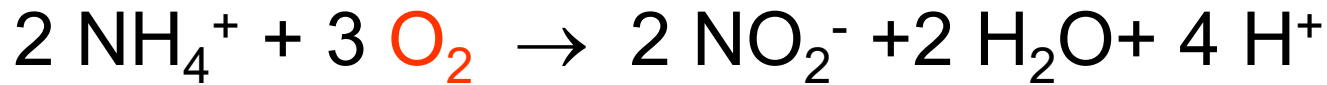
Το οργανικό άζωτο (κυρίως αμινοξέα)  $\rightarrow$   $\text{NH}_4^+$  (όλοι οι οργανισμοί)

- Αφομοίωση των ιόντων  $\text{NH}_4^+$



## 2.7.2. Νιτροποίηση: Μετατροπή $\text{NH}_4^+$ σε $\text{NO}_2^-$ και $\text{NO}_3^-$

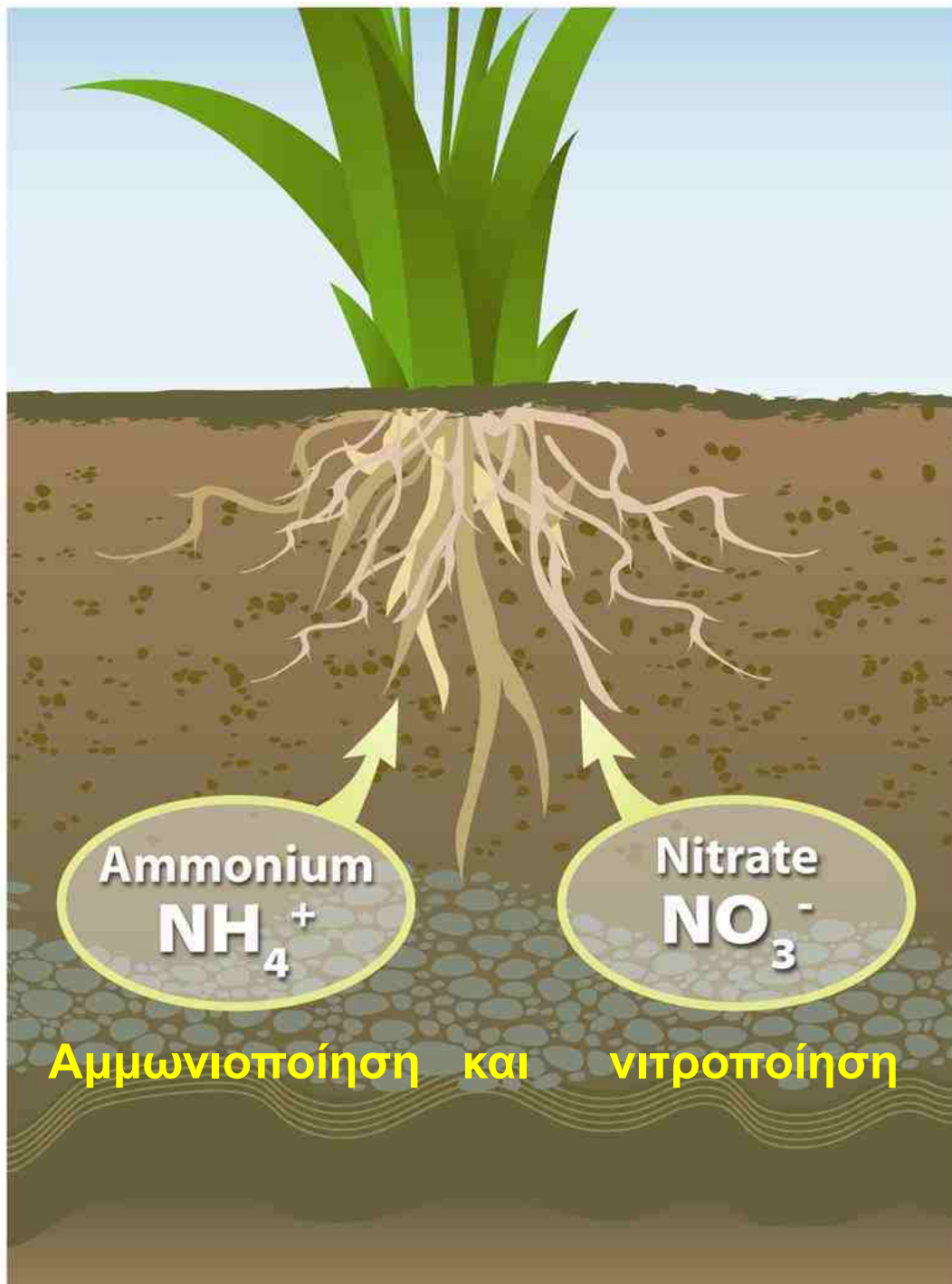
- *Nitrosomonas* ( $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$ )



- *Nitrobacter* ( $\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$ ) νιτρώδη σε νιτρικά



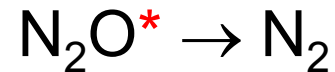
1 + 2: θρέψη των φυτών



1, 2: θρέψη των φυτών

## 2.7.3. Απονίτρωση:

$\text{NO}_3^- \rightarrow \text{N}_2\text{O}$  (Πολλά είδη π.χ. *Pseudomonas*, *Clostridium* και *Bacillus*)

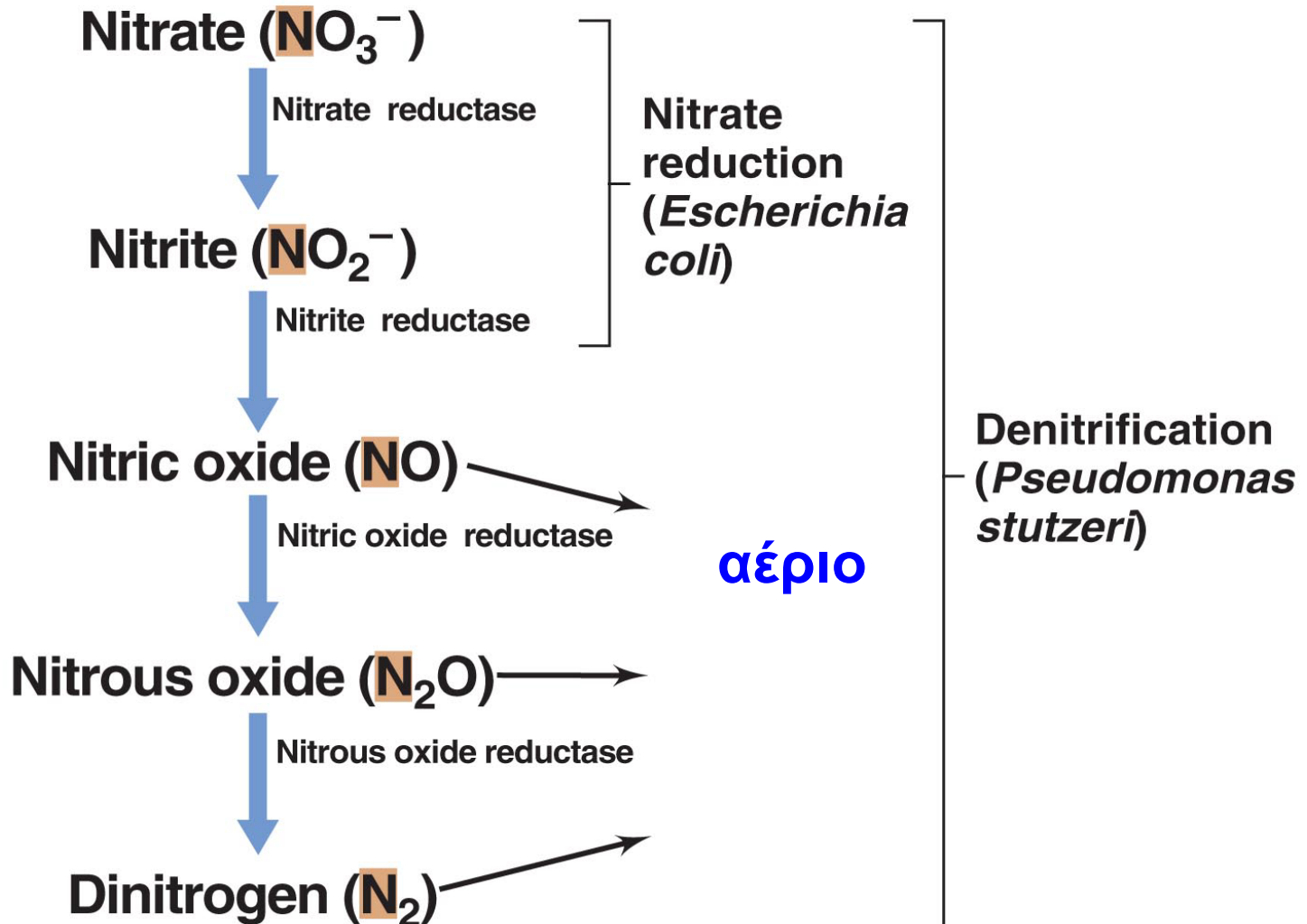


**Αναεροβική αναπνοή πολλών οργανισμών**

\*ΥΠΟ ΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ

## 2.7.3. Απονίτρωση:

Προϊόντα αναεροβικής αναγωγής των νιτρικών ( $\text{NO}_3^-$ )



Τα ένζυμα των μεταβολικών αυτών δρόμων καταστέλλονται από το  $\text{O}_2$

## 2.7.3. Απονίτρωση

- Τα περισσότερα προϊόντα της αναγωγής νιτρικών είναι **αέρια** ( $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ).
- Τα αέρια αυτά που περιέχουν N απομακρύνονται από τους οργανισμούς στην ατμόσφαιρα (**απονίτρωση**).
- Η απονίτρωση είναι η κύρια βιολογική πηγή του αερίου  $\text{N}_2$ .

## 2.7.4. Αφομοιωτική αναγωγή των νιτρικών:

$\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NH}_4^+ \rightarrow$  οργανικό άζωτο (πολλά είδη μικροβίων και φυτών)

## 2.7.5. Δέσμευση του μοριακού $\text{N}_2$ :

$\text{N}_2 \rightarrow \text{NH}_4^+$

Ελεύθεροι δεσμευτές

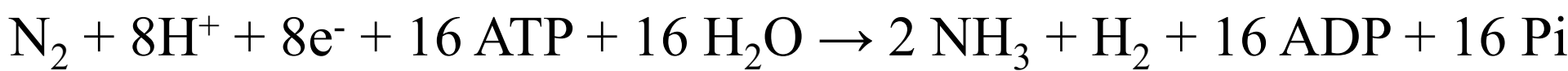
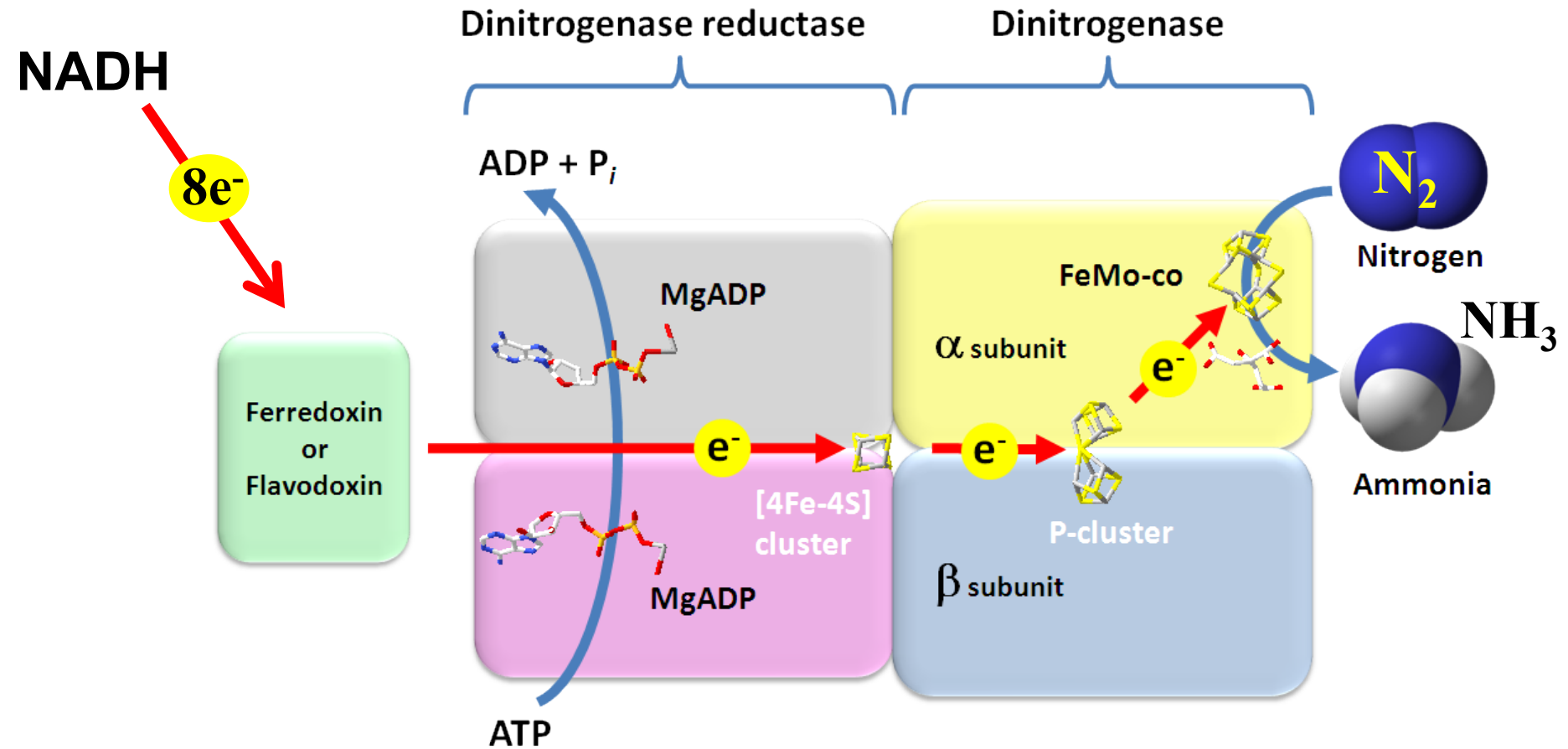
π.χ. *Azotobacter* και *Azospirillum*

Συμβιοτικοί δεσμευτές

π.χ. *Rhizobium* και *Bradyrhizobium*

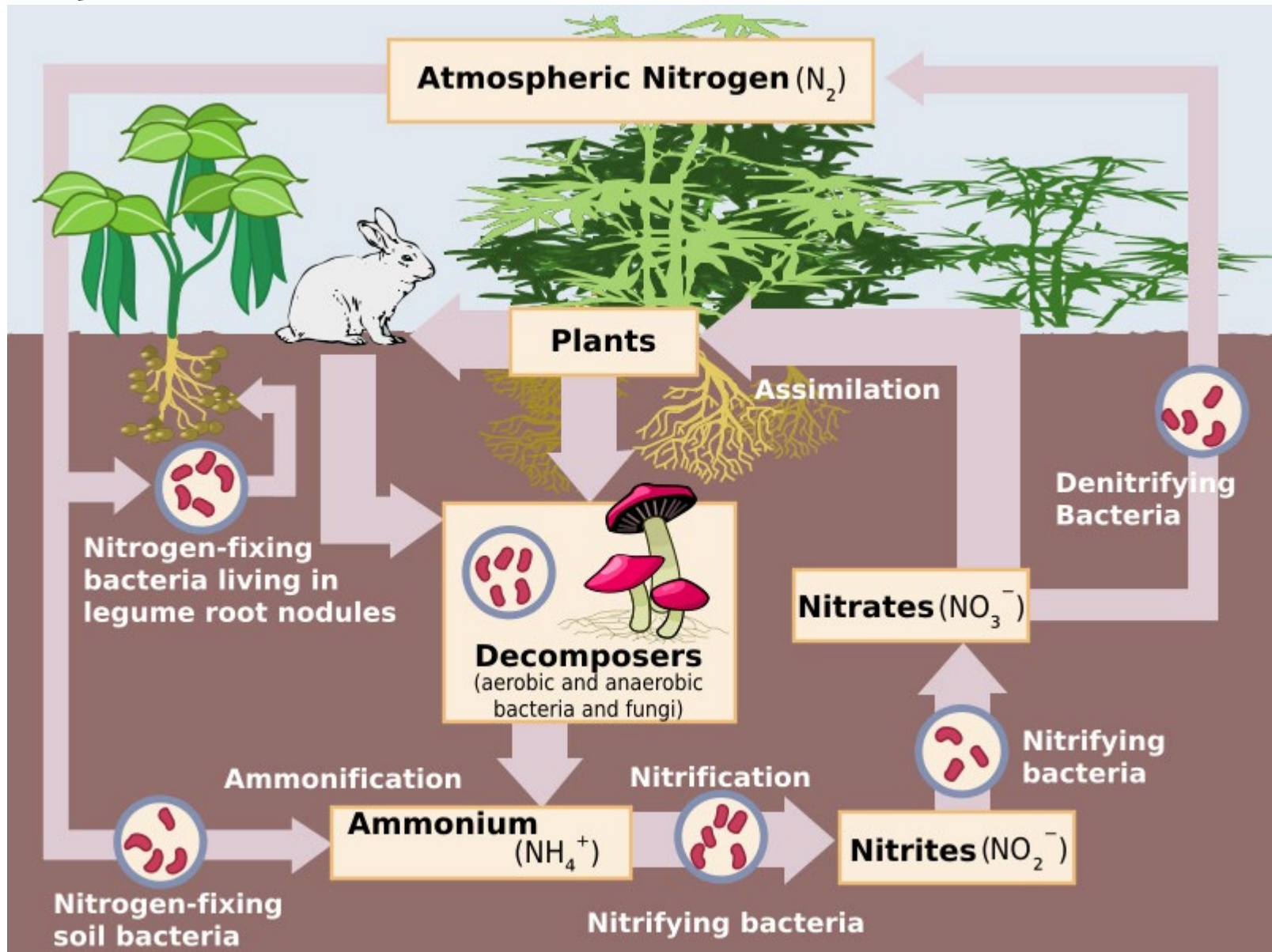
Κυανοβακτήρια προσκολλημένα στο φυτό *Spartina*, σε βάλτους αλμυρού νερού

## 2.7.5. Δέσμευση N<sub>2</sub> μέσω του ενζυμικού συμπλέγματος της νιτρογενάσης

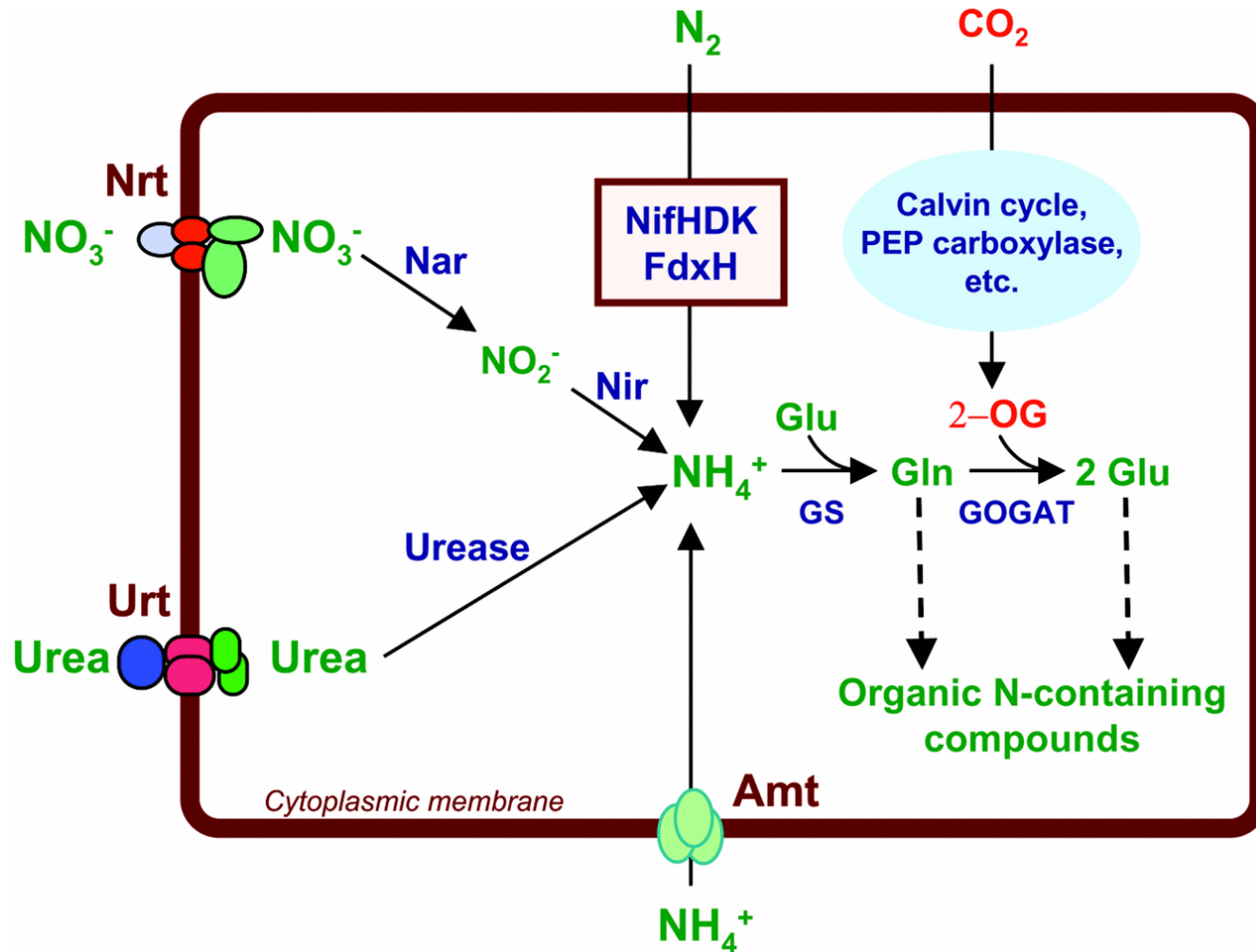




# Ο κύκλος του αζώτου



## 2.7.6. Κύριοι οδοί αφομοίωσης του αζώτου στα κυανοβακτήρια



## 2.7.7. Τέστ αναγωγής αζώτου



Θετική αναγωγή  $\text{NO}_3^-$



Θετική αναγωγή  $\text{NO}_3^-$   
παρουσία Zn

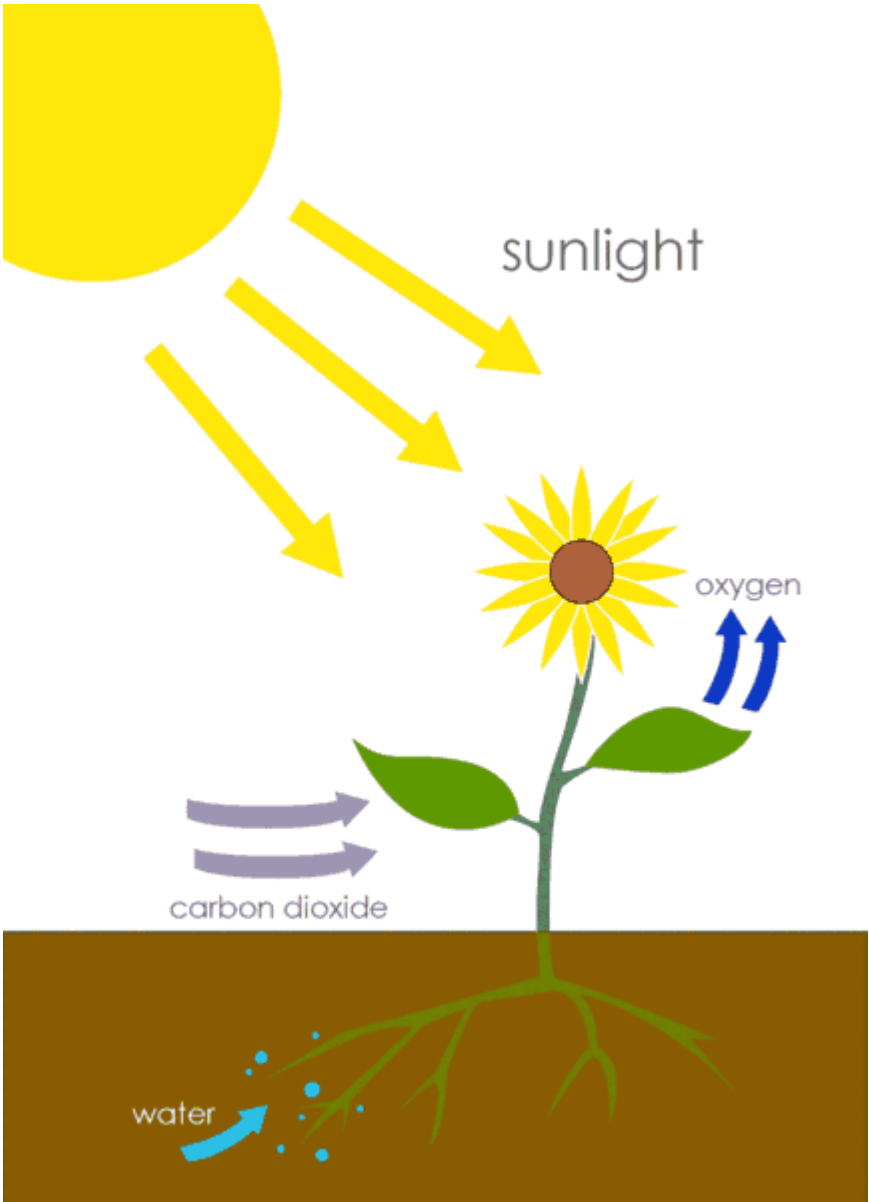


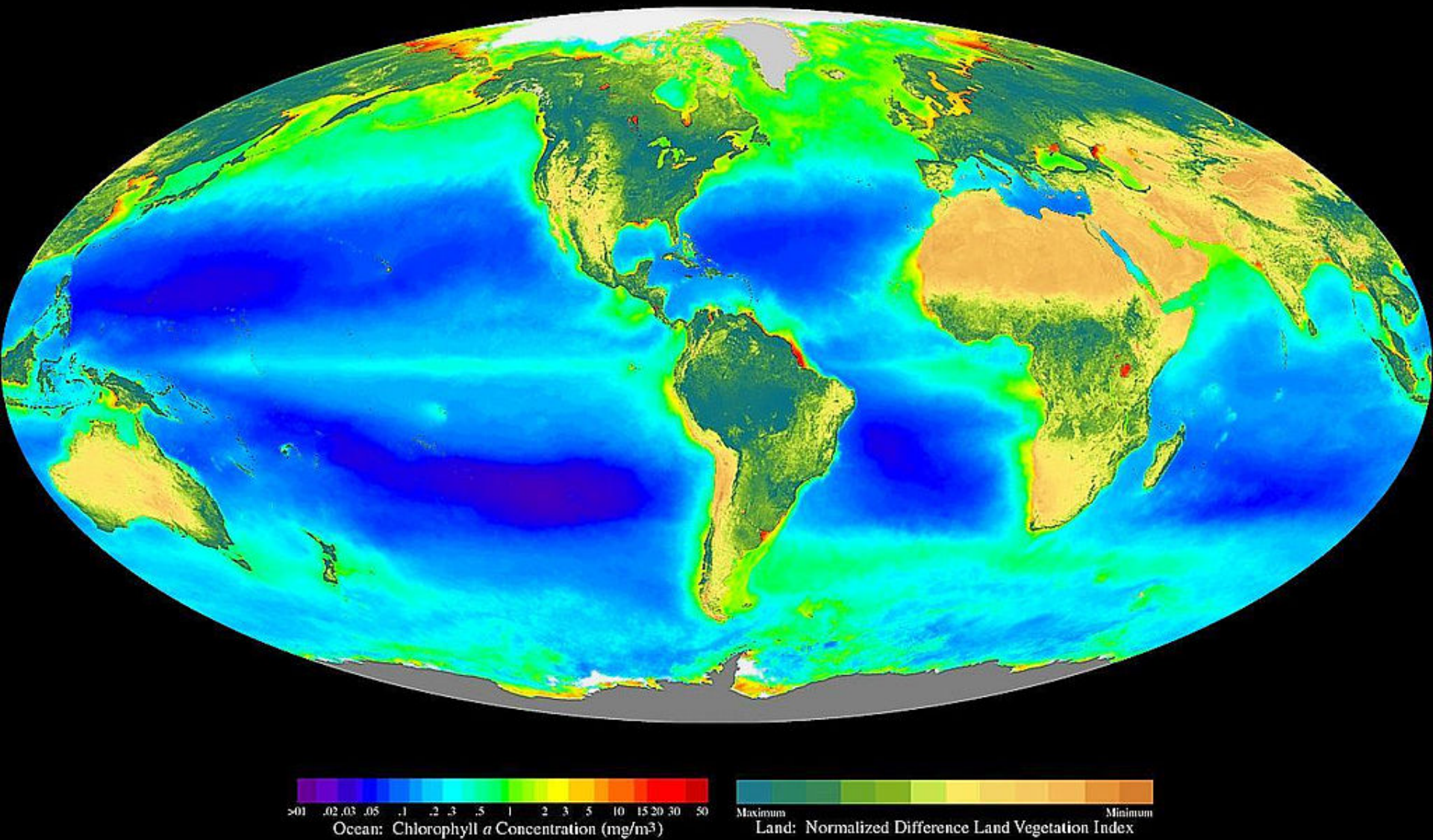
Αρνητική αναγωγή  $\text{NO}_3^-$   
παρουσία Zn

# 3. ΑΝΑΒΟΛΙΣΜΟΣ

Άλλοι τρόποι για τη σύνθεση του ATP

Αναβολισμός: **Φωτοσύνθεση**





Η φωτοσύνθεση (χλωροφύλλη) στον πλανήτη Γη

# 3.1. Φωτοσύνθεση – μετατροπή της φωτεινής ενέργειας του ήλιου σε χημική ενέργεια

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

- Η χημική ενέργεια χρησιμοποιείται για την **αναγωγή** του CO<sub>2</sub> σε σάκχαρα (CH<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>  
$$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{E} \rightarrow (\text{CH}_2\text{O})_n + \text{O}_2$$
- Έχουμε δέσμευση του C και ανακύκλωσή του στο περιβάλλον (η σημερινή μορφή της ζωής)
- Η φωτοσύνθεση μπορεί να χρησιμοποιεί O<sub>2</sub> (**οξυγονική**):
  - Ανώτερα φυτά, κυανοβακτήρια
  - Υπάρχει και φωτοσύνθεση χωρίς O<sub>2</sub> (**ανοξική**)
    - Πράσινα και πορφυρά βακτήρια, ηλιοβακτήρια



## 3.2. Μηχανισμός Φωτοσύνθεσης-γενικά χαρακτηριστικά

### – A. Αντιδράσεις που εξαρτώνται από το φως

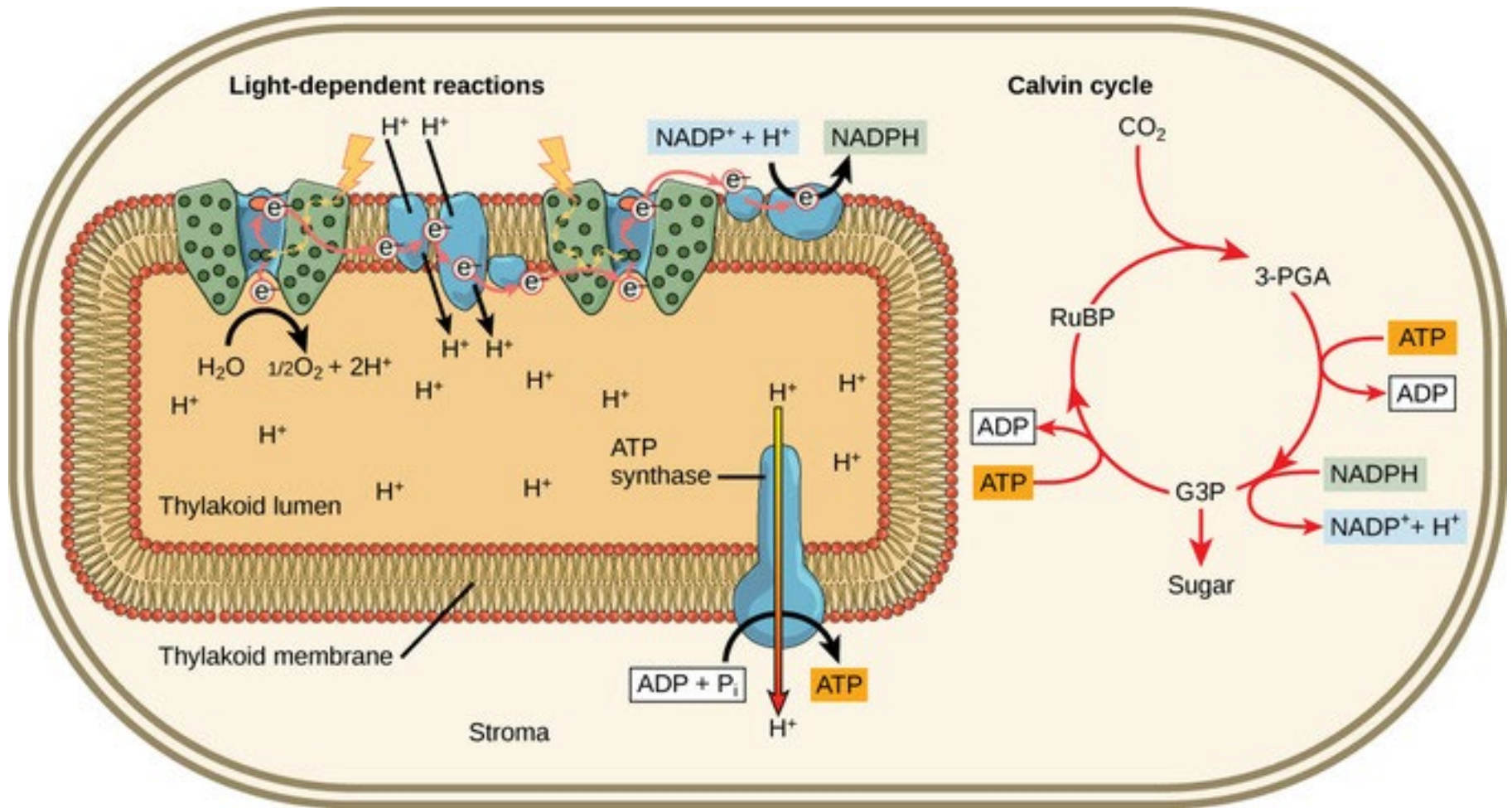
- Η ηλιακή ενέργεια συλλέγεται από τις **φωτοσυνθετικές χρωστικές** που είναι ενσωματωμένες σε μεμβράνες και μεταφέρεται σε ένα ειδικό **κέντρο αντιδράσεων** (RC) που αποτελείται από φωτοσυνθετικές χρωστικές και πρωτεΐνες.
- Η ενέργεια του φωτός χρησιμοποιείται **για να απομακρυνθεί ένα ηλεκτρόνιο** χαμηλού δυναμικού από ένα **δότη ηλεκτρονίων** ο οποίος οξειδώνεται (επανανάγεται τελικά παίρνοντας ηλεκτρόνια από το νερό που οξειδώνεται σε  $O_2$ ).
- Το ηλεκτρόνιο μεταφέρεται μέσω διαφορετικών συστημάτων σε καταστάσεις χαμηλότερης ενέργειας (δυναμικού), ενώ πρωτόνια μεταφέρονται εξωκυτταρικά και δημιουργούν κλίση.
- Η είσοδος των πρωτονίων μέσω της ATP συνθετάσης παράγει ATP.
- Στην **κυκλική φωτοσύνθεση**, τα ηλεκτρόνια κυκλοφορούν κυκλικά και χρησιμοποιούνται αποκλειστικά στην αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων της φωτοσύνθεσης (παραγωγή ATP).
- Στη **μη κυκλική φωτοσύνθεση**, τα ηλεκτρόνια χρησιμοποιούνται και για την αναγωγή του  $NADP^+$  σε  $NADPH$ .

## 3.2. Μηχανισμός Φωτοσύνθεσης-γενικά χαρακτηριστικά

### B. Αντιδράσεις που δεν εξαρτώνται από το φως

- ATP και NADPH από τη φωτεινή φάση χρησιμοποιούνται για την αναγωγή του CO<sub>2</sub> για το σχηματισμό οργανικού C. Έτσι έχουμε μονιμοποίηση του άνθρακα.
- Ο ανηγμένος οργανικός άνθρακας μετατρέπεται σε γλυκόζη ή άλλους υδατάνθρακες.

# Η φωτοσύνθεση σε ένα χλωροπλάστη



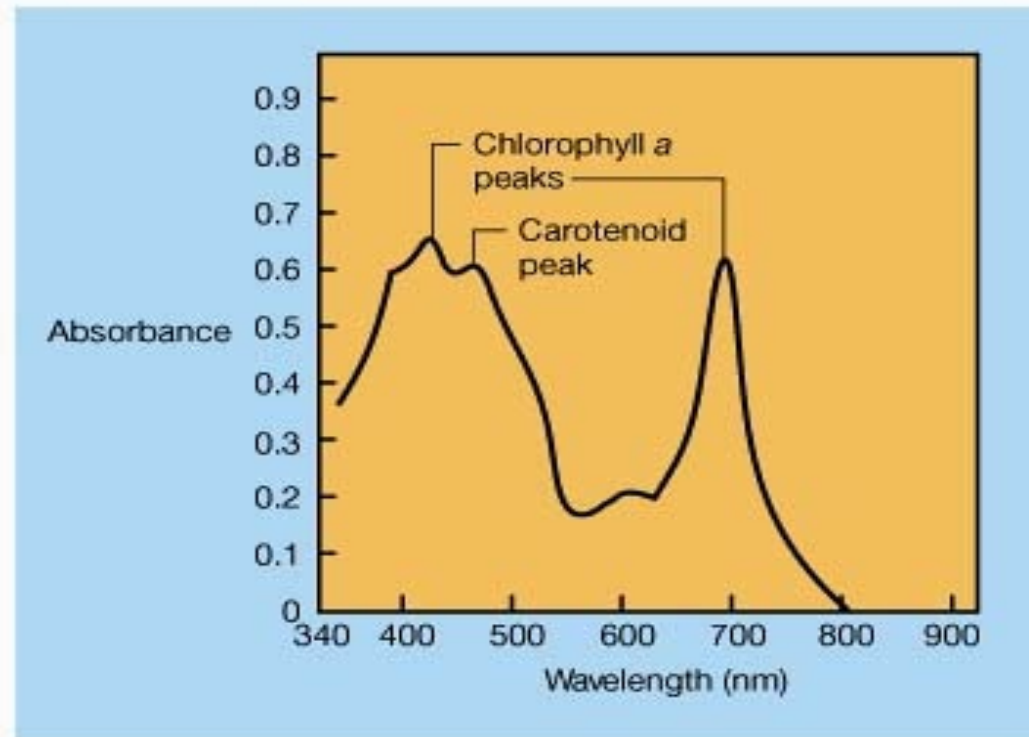
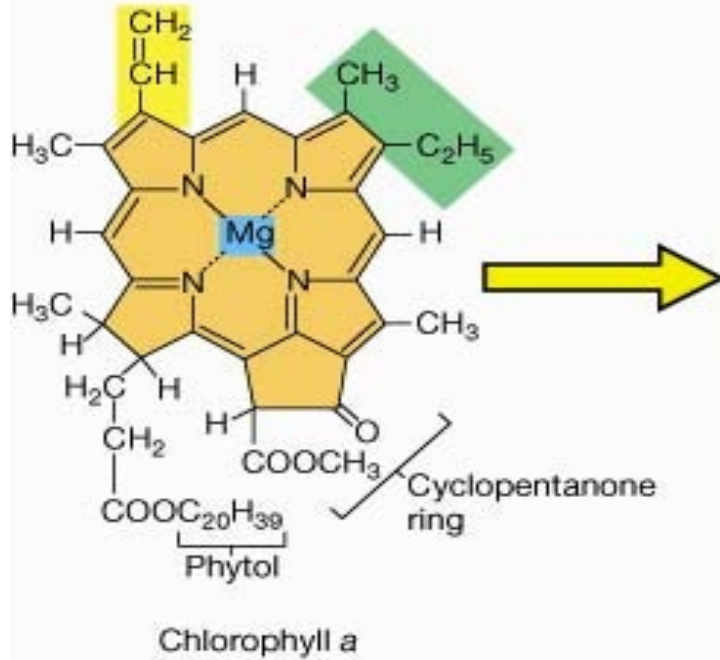
## **3.3. Φωτοσυνθετικές Χρωστικές**

Χλωροφύλλες

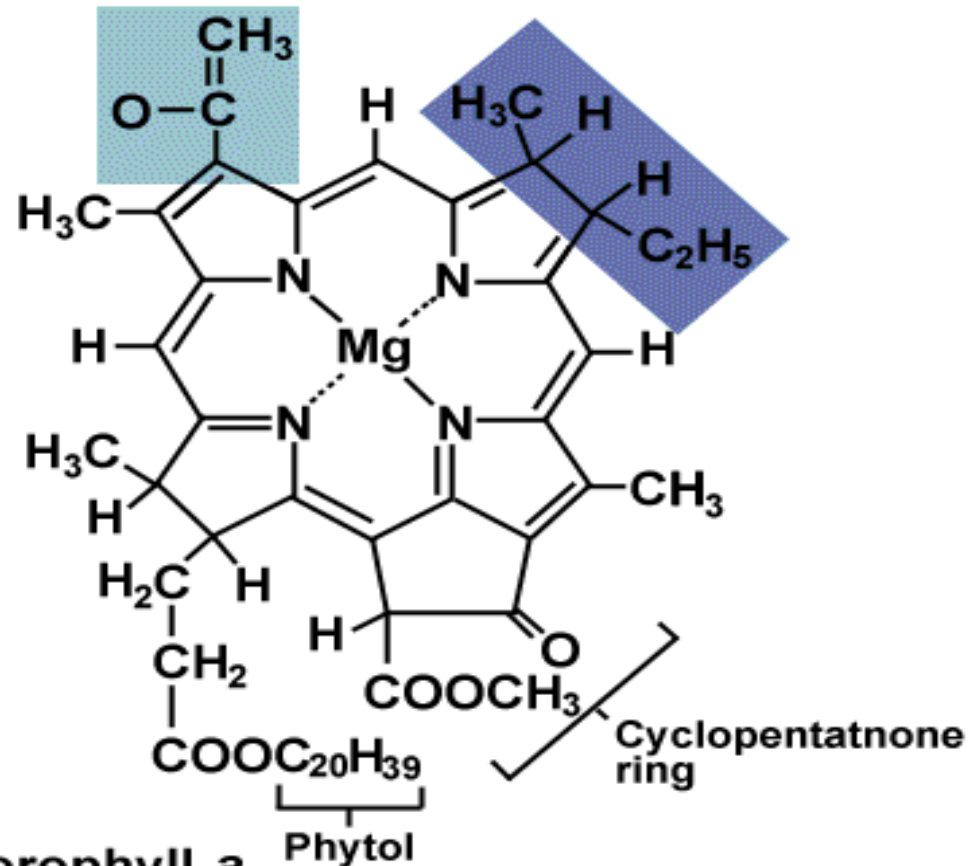
# Βακτηριοχλωροφύλλες φωτοσυνθετικών βακτηρίων

	<b>Δότης e</b>	<b>Αποδέκτης e</b>
Πορφυρά μη θειο βακτήρια	Βακτηριοχλωροφύλλες a, b	Βακτηριοφαιοφυτίνες a, Q <sub>A</sub> , Q <sub>B</sub>
Πράσινα θείο βακτήρια	Βακτηριοχλωροφύλλες c, d, e	Βακτηριοφυτίνη a και πρωτεΐνες FeS
Κυανοβακτήρια, ΦΣ1	Χλωροφύλλη a	Χλωροφύλλη a και πρωτεΐνες FeS
Κυανοβακτήρια, ΦΣ2	Χλωροφύλλη a	Φαιοφυτίνη a, Q <sub>A</sub> , Q <sub>B</sub> και πλαστοκινόνες
Ηλιοβακτήρια	Βακτηριοχλωροφύλλη g	Βακτηριοχλωροφύλλη c, πρωτεΐνες FeS
Φυτά	Χλωροφύλλη b	

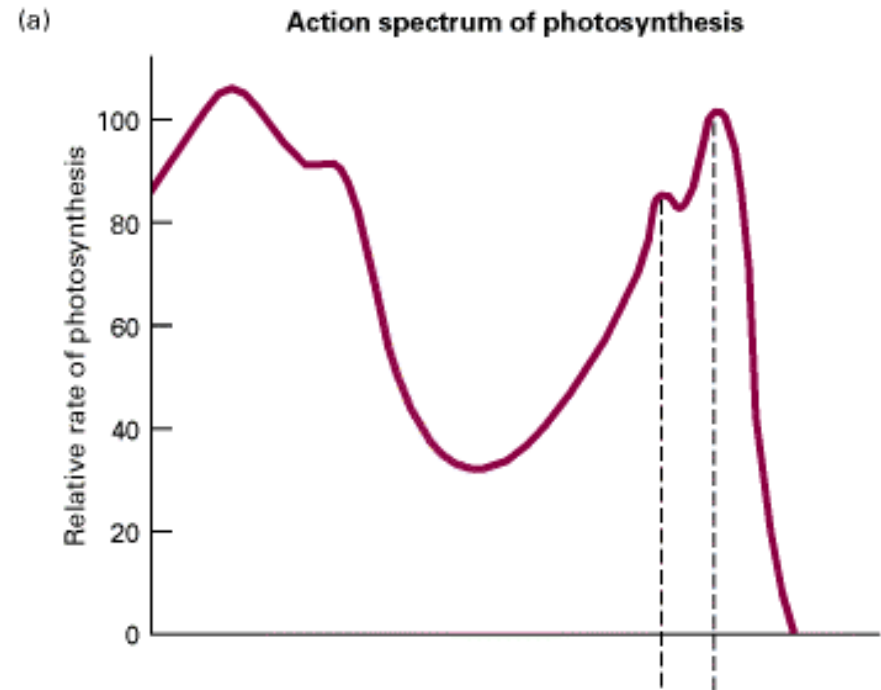
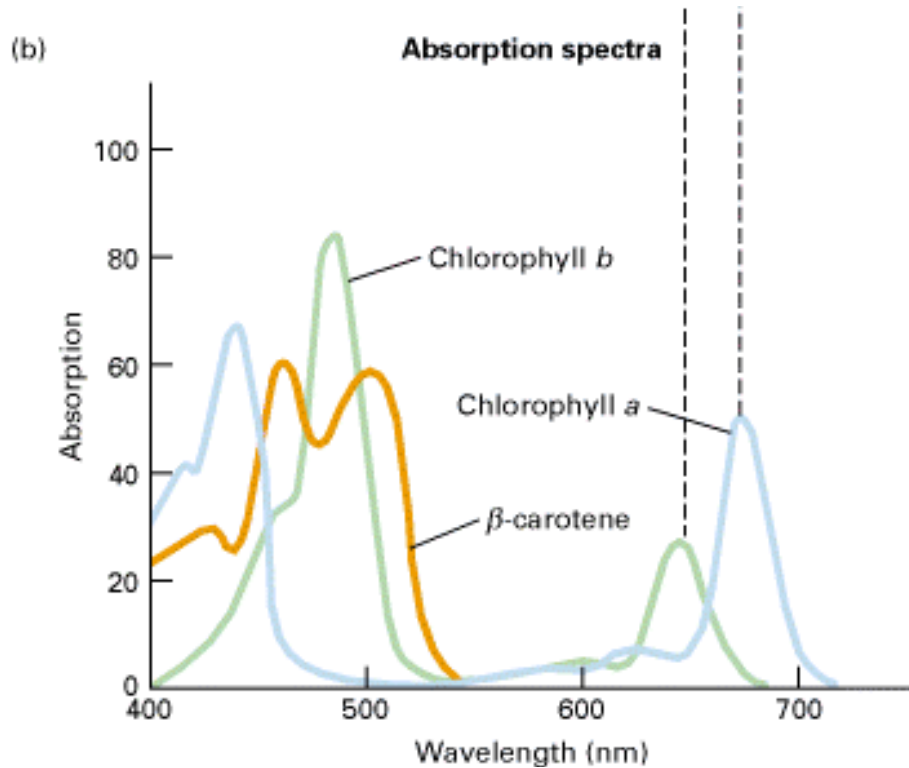
# Χλωροφύλλη a



# Βακτηριοχλωροφύλλη α



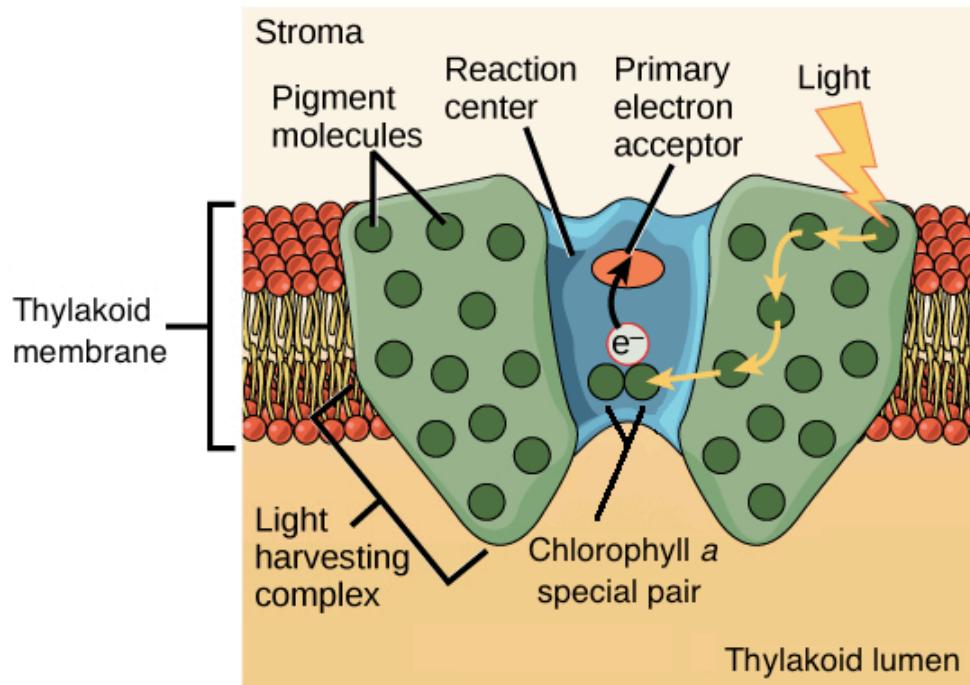
**Bacteriochlorophyll a**



Φάσματα απορρόφησης χλωροφυλλών *a*, *b* και  $\beta$  καροτενίου και ρυθμός φωτοσύνθεσης ανά μήκος κύματος



## Photosystem



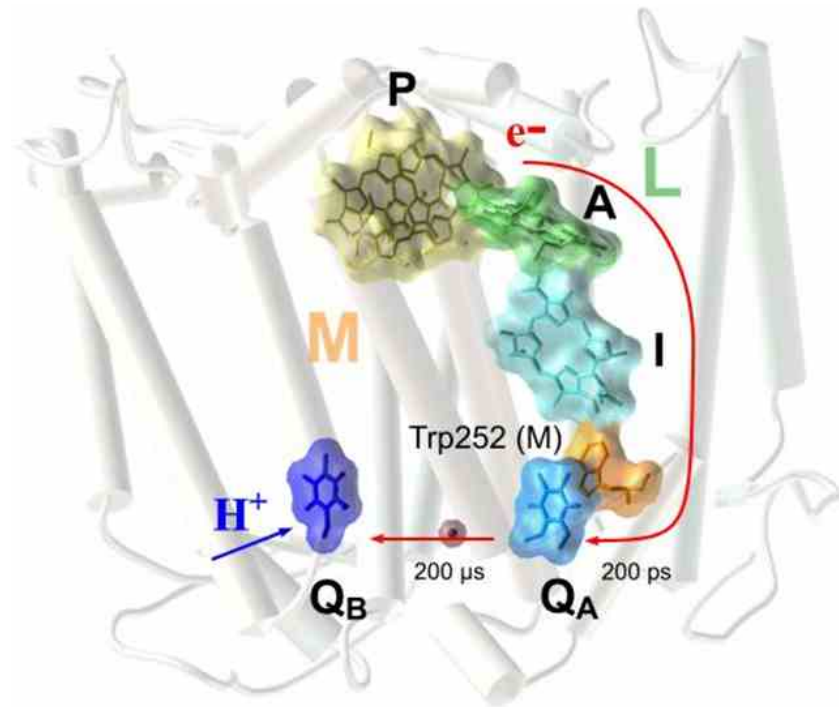
Οι φωτοσυνθετικές χρωστικές δρουν ως ενεργειακή χοάνη, μεταφέροντας ενέργεια από το φως προς ένα κύριο **κέντρο αντίδρασης (RC)**.

Η ενέργεια του φωτός μεταφέρεται αρχικά από ένα μόριο χρωστικής σε ένα άλλο μέσω άμεσων ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων (μεταφορά ενέργειας συντονισμού). Η διαδικασία επαναλαμβάνοντας πολλές φορές. Σε αυτές τις μεταβιβάσεις, το μόριο υποδοχής μπορεί να απαιτεί λιγότερη ενέργεια από τον δότη (δηλαδή, μπορεί να απορροφήσει φως ενός μεγαλύτερο μήκος κύματος).

<https://www.khanacademy.org/science/biology/photosynthesis-in-plants/the-light-dependent-reactions-of-photosynthesis/a/light-dependent-reactions>

# Κέντρο αντιδράσης (RC) για τη μεταφορά ηλεκτρονίων και πρωτονίων

Η μεταφορά των ηλεκτρονίων ξεκινά από ενδιάμεσους αποδοχείς (βακτηριοχλωροφύλλη και βακτηριοφυτίνη) που μεταφέρουν τα ηλεκτρόνια στον **πρωτογενή δότη P**. Είναι ένα **διμερές βακτηριοχλωροφύλλης** το οποίο μεταφέρει κατόπιν τα ηλεκτρόνια σε 200 ps σε μια κινόνη  $Q_A$  και κατόπιν σε μια δεύτερη κινόνη  $Q_B$  ( $\mu\text{s}$ -ms). Η μεταφορά ηλεκτρονίων από το  $Q_A$  στο  $Q_B$  είναι συνδυασμένη με **πρόσληψη πρωτονίων** από το κυτταρόπλασμα.



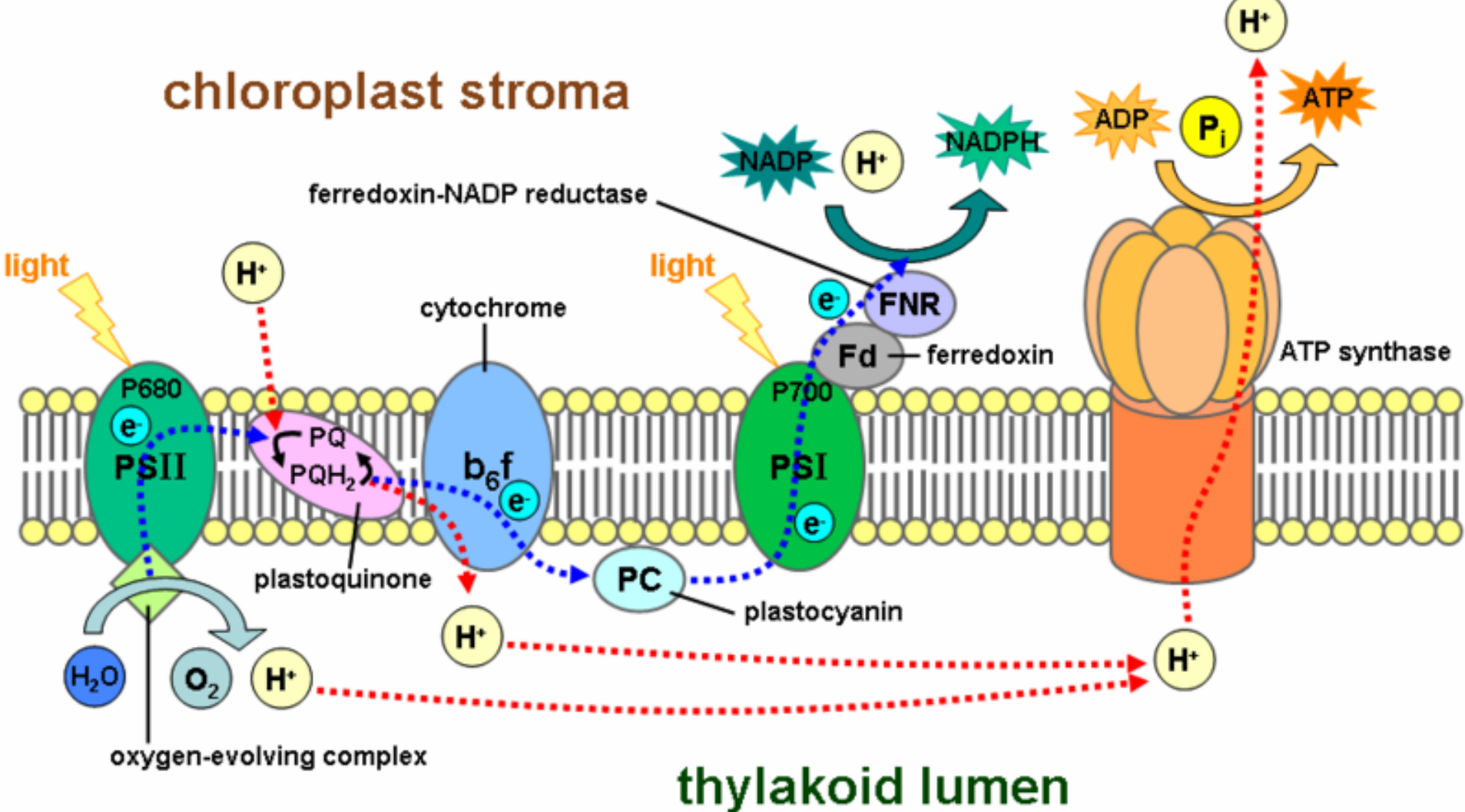
Απορρόφηση δευτέρου φωτονίου από το **P<sup>+</sup>**, επάγει τη διπλή αναγωγή και πρωτονίωση της δεύτερης κινόνης  $Q_B$  και οδηγεί στο σχηματισμό του  $Q_B\text{H}_2$ , το οποίο απελευθερώνεται από το RC. Ο σχηματισμός της κινόλης ( $Q_B\text{H}_2$ ) έχει καίρια σημασία για τη φωτοσύνθεση καθώς η απελευθέρωσή της ξεκινά το σχηματισμό της κλίσης πρωτονίων που είναι υπεύθυνη για τη σύνθεση του ATP.

### 3.3.1. Οξυγονική φωτοσύνθεση

#### A. Αντιδράσεις που εξαρτώνται από το φως

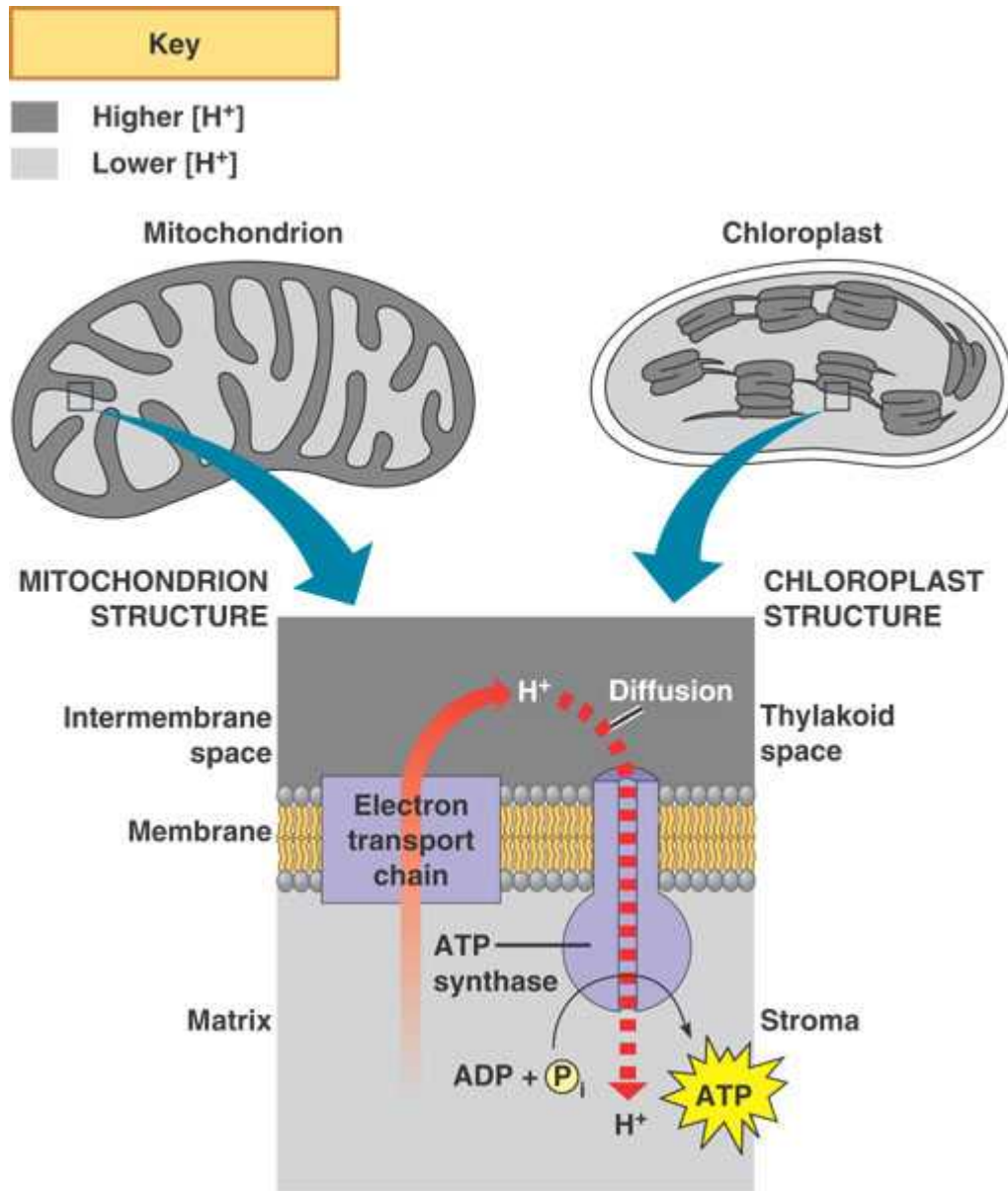
- Στα κυανοβακτήρια, προχλωρόφυτα και στους ευκαρυωτικούς χλωροπλάστες.
- Η απορρόφηση φωτονίων από το κέντρο αντίδρασης συνοδεύεται με απώλεια  $e^-$  από τη χλωροφύλλη.
- Τα  $e^-$  μεταφέρονται σε κινόνες.
- Η απώλεια  $e^-$  από τη χλωροφύλλη αναπληρώνεται με πρόσληψή τους από το  $H_2O$  που οξειδώνεται σε  $O_2$  (φωτόλυση του νερού).
- Τελικός δέκτης  $e^-$  ο C που ανάγεται σε  $(CH_2O)_v$ .
- **Δύο** φωτοσυστήματα: PSII και PSI.
- Κύριος ρόλος είναι η παραγωγή **NADPH** και **ATP** (από χημειώσμωση).

# chloroplast stroma

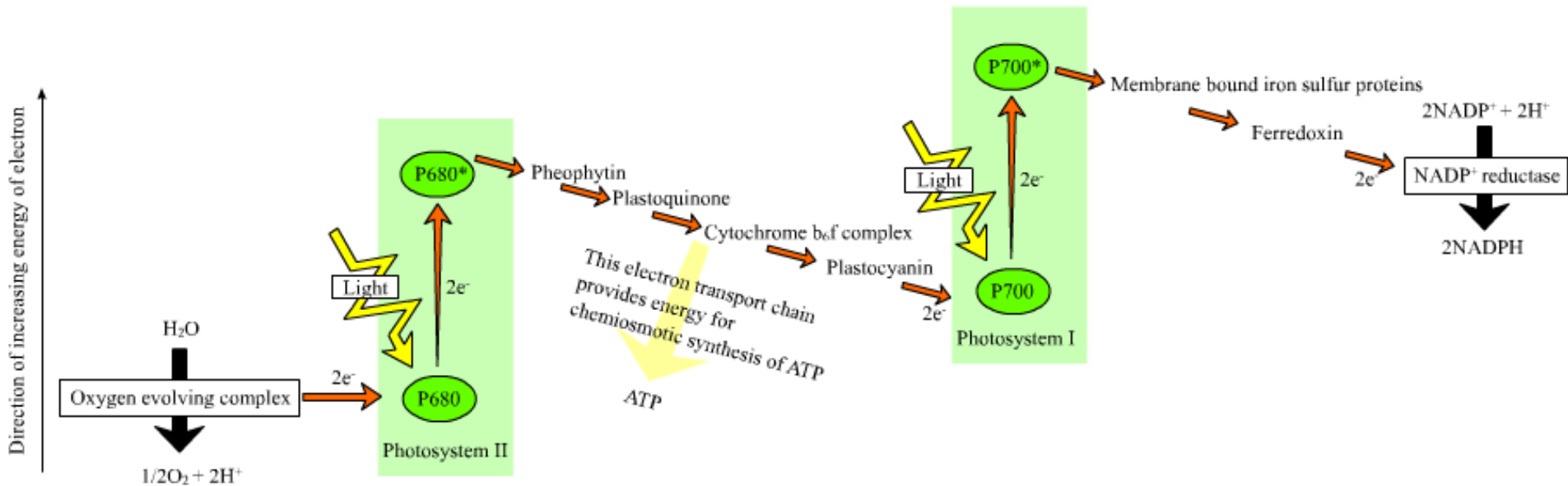


# thylakoid lumen

«Το χαμένο ηλεκτρόνιο από τη χλωροφύλλη  $P_{680}$  αναπληρώνεται με τη μεταφορά ηλεκτρονίου από το νερό (που διασπάται προς υδρογόνο και μοριακό οξυγόνο) προς το μόριο της οξειδωμένης χλωροφύλλης  $P_{680}$ . Τα ηλεκτρόνια που παράγονται από το PSII μεταφέρονται μέσω μεμβρανικών φορέων στο ενεργό κέντρο του PSI, τη χλωροφύλλη  $P_{700}$ . Κατά τη μεταφορά αυτή δημιουργείται διαβάθμιση πρωτονίων ...»

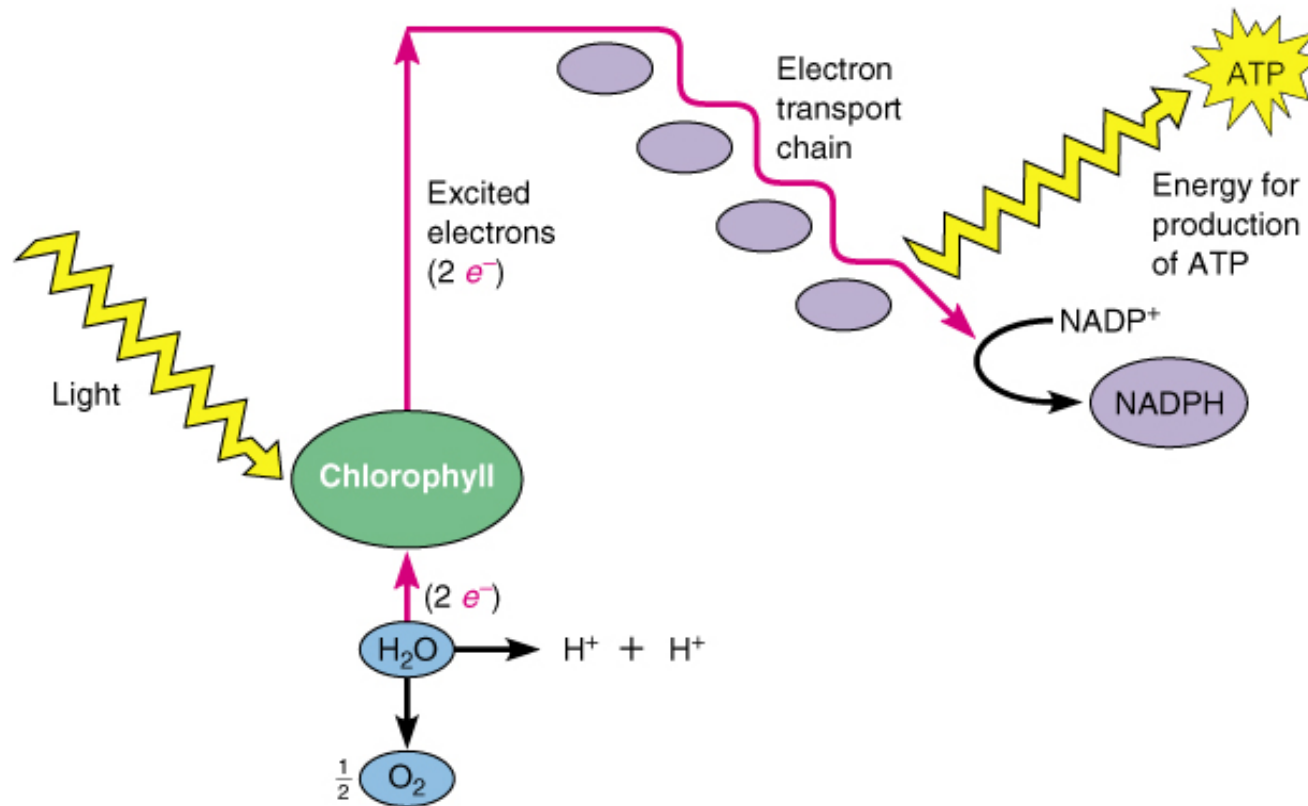


Περίληψη χημειώσμωσης στο μιτοχόνδριο και χλωροπλάστες



## Η «Z» φωτοσύνθεση

Παρατηρείστε τη αύξηση της ενέργειας των ηλεκτρονίων από την επίδραση του φωτός στα PSII και PSI. Αυτή η αύξηση επιτρέπει τη δημιουργία αλυσίδας μεταφοράς ηλεκτρονίων και τη δημιουργία κλίσης  $\text{H}^+$  για τη μετέπειτα σύνθεση ATP.



**(b)** Noncyclic photophosphorylation

Copyright © 2001 Benjamin Cummings, an imprint of Addison Wesley Longman, Inc.

## Μη κυκλική («Z») φωτοσύνθεση:

Ροή ηλεκτρονίων από το PSII στο PSI.  
Παραγωγή ATP και NADPH.

### 3.1.1. Οξυγονική φωτοσύνθεση

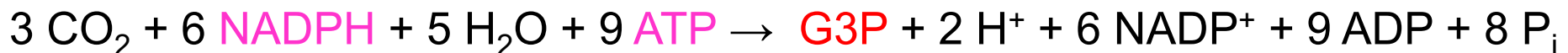
#### A. Αντιδράσεις που εξαρτώνται από το φως

Η ενέργεια από τη φωτεινή αντίδραση (ATP και NADPH) χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του CO<sub>2</sub> σε σάκχαρα στον κύκλο του Calvin.

#### B. Αντιδράσεις που δεν εξαρτώνται από το φως

Η ενέργεια από τη φωτεινή αντίδραση (ATP και NADPH) χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του CO<sub>2</sub> σε σάκχαρα.

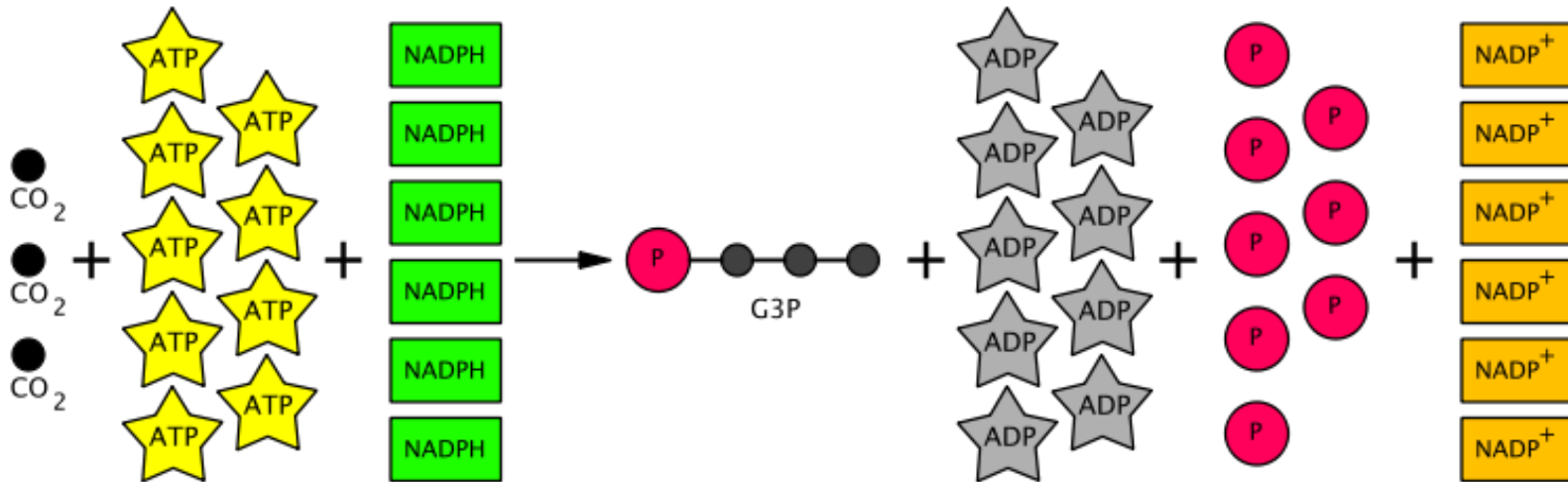
Συνολική αντίδραση (A και B):





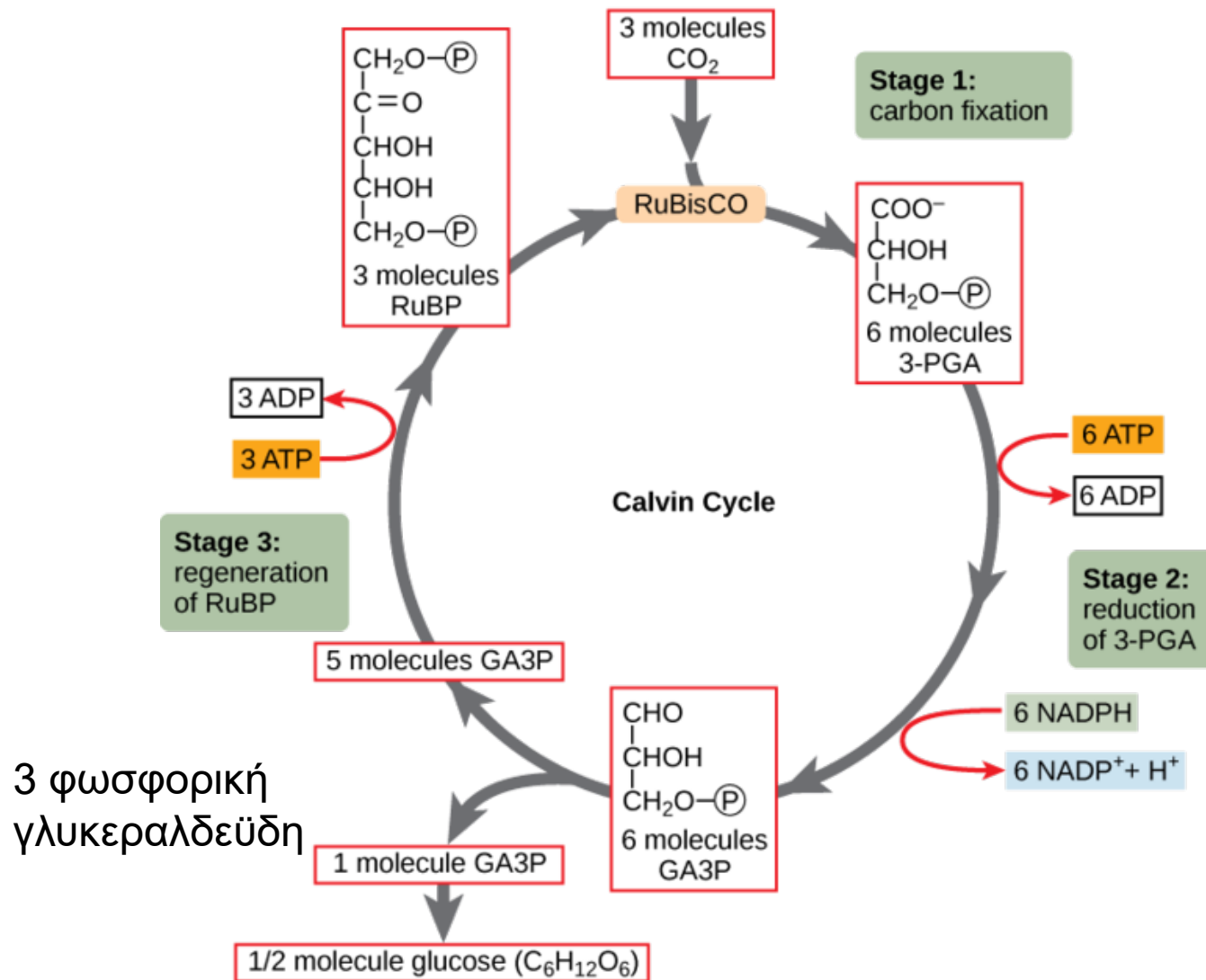
## Β. Αντιδράσεις που δεν εξαρτώνται από το φως

Η ενέργεια από τη φωτεινή αντίδραση (ATP και NADPH) χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του CO<sub>2</sub> σε σάκχαρα.



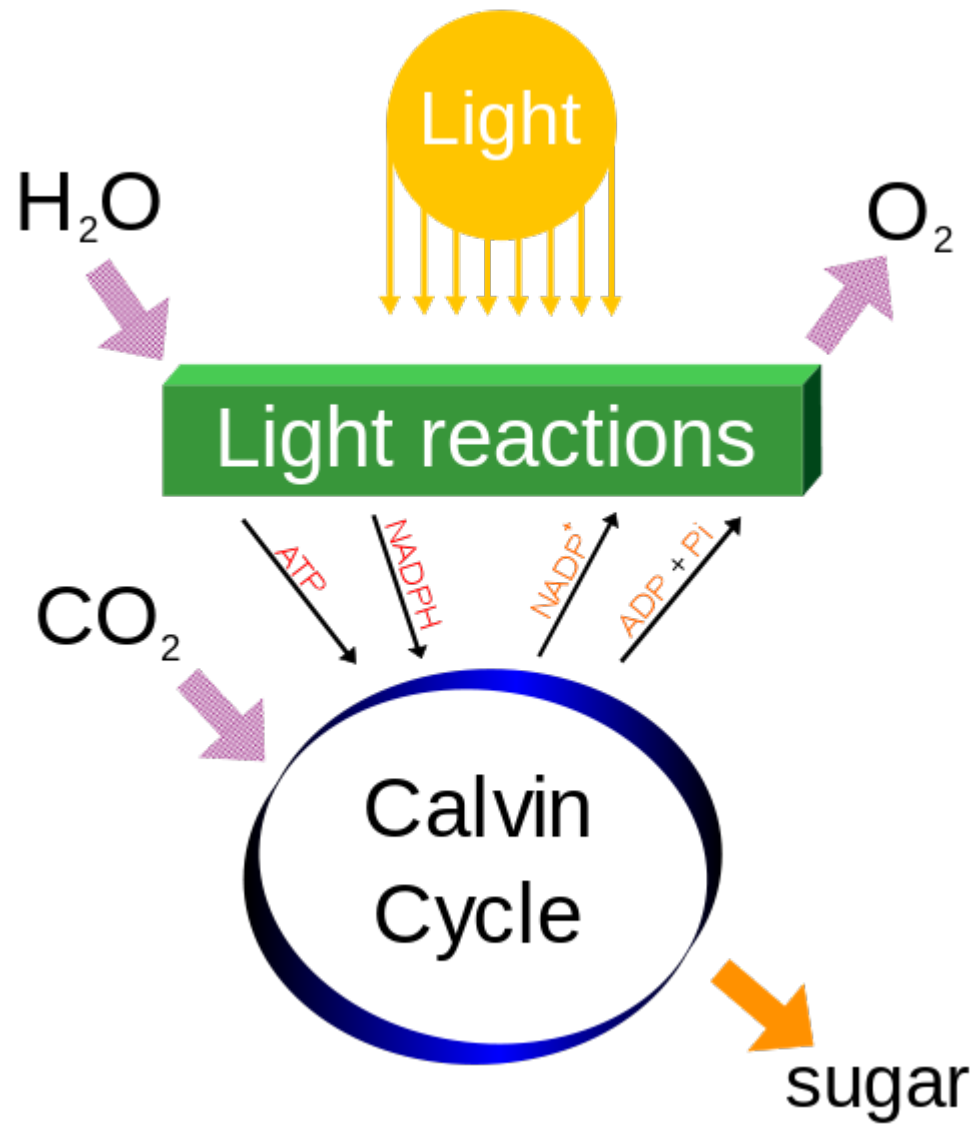
Για να γίνει **ένα μόριο γλυκόζης** (που μπορεί να δημιουργηθεί από 2 μόρια 3-φωσφο γλυκεραλδεΐδη (G3P)) απαιτούνται **6 στροφές** του κύκλου του Calvin.

Πλεονάζουσες G3P μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να σχηματισθούν άλλοι υδατάνθρακες όπως άμυλο, σακχαρόζη, και κυτταρίνη, ανάλογα με το τι χρειάζεται το φυτό.



## B. Αντιδράσεις που δεν εξαρτώνται από το φως: Κύκλος του Calvin

[https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Microbiology/Book: Microbiology \(Boundless\)/5: Microbial Metabolism/5.12: Biosynthesis/5.12C: The Calvin Cycle](https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Microbiology/Book: Microbiology (Boundless)/5: Microbial Metabolism/5.12: Biosynthesis/5.12C: The Calvin Cycle)



Περίληψη φωτοσύνθεσης

# Ταξινόμηση των φωτοσυνθετικών βακτηρίων

❖ 5 ομάδες στην επικράτεια (domain) **βακτήρια** (16S rRNA)

• Αεροβική φωτοσύνθεση

1. Κυανοβακτήρια και προχλωρόφυτα

• Ανοξική φωτοσύνθεση

2. Πορφυρά βακτήρια

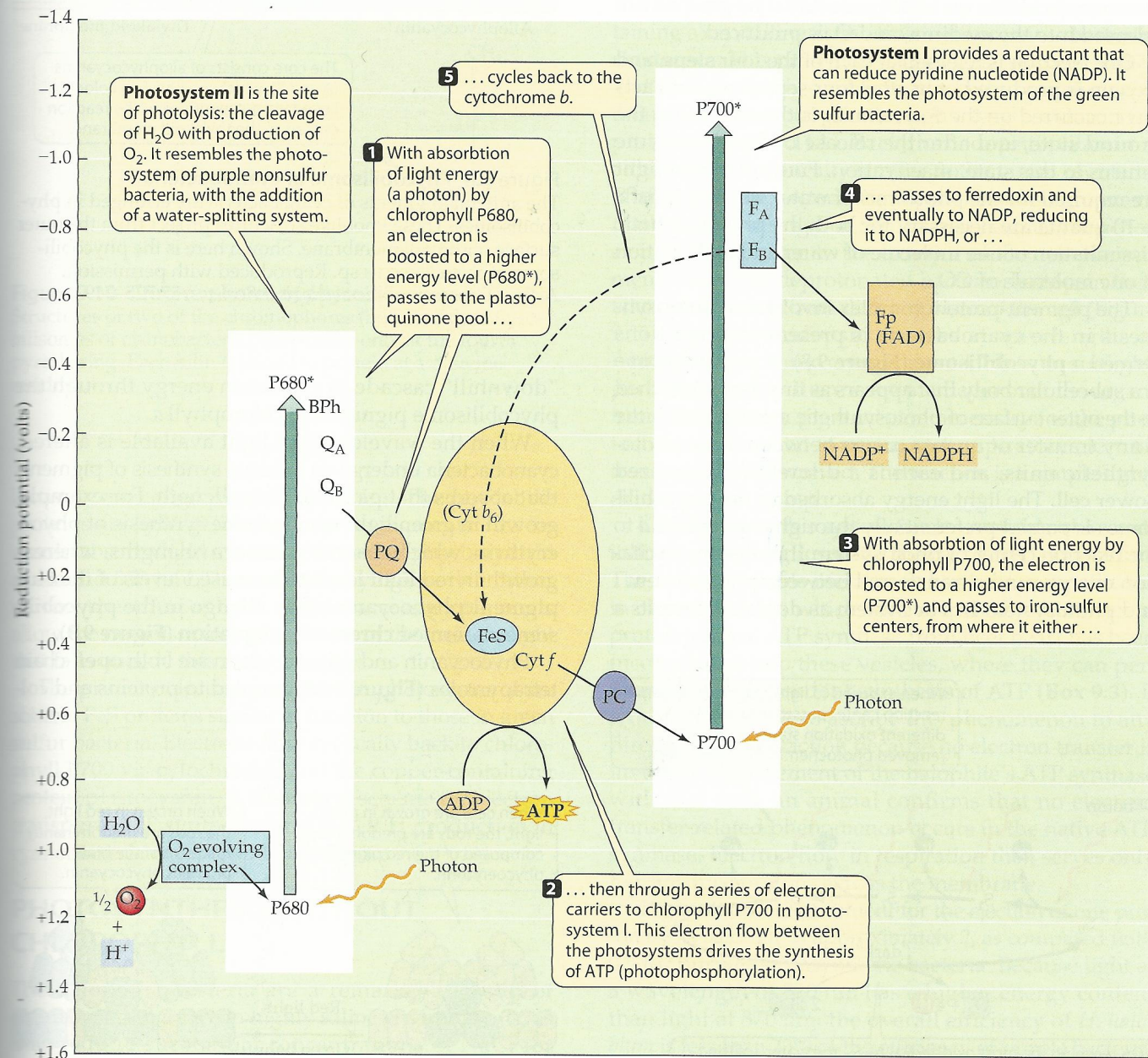
3. Πράσινα θείο βακτήρια

4. Ηλιοβακτήρια

5. Πράσινα (μη θείο) βακτήρια

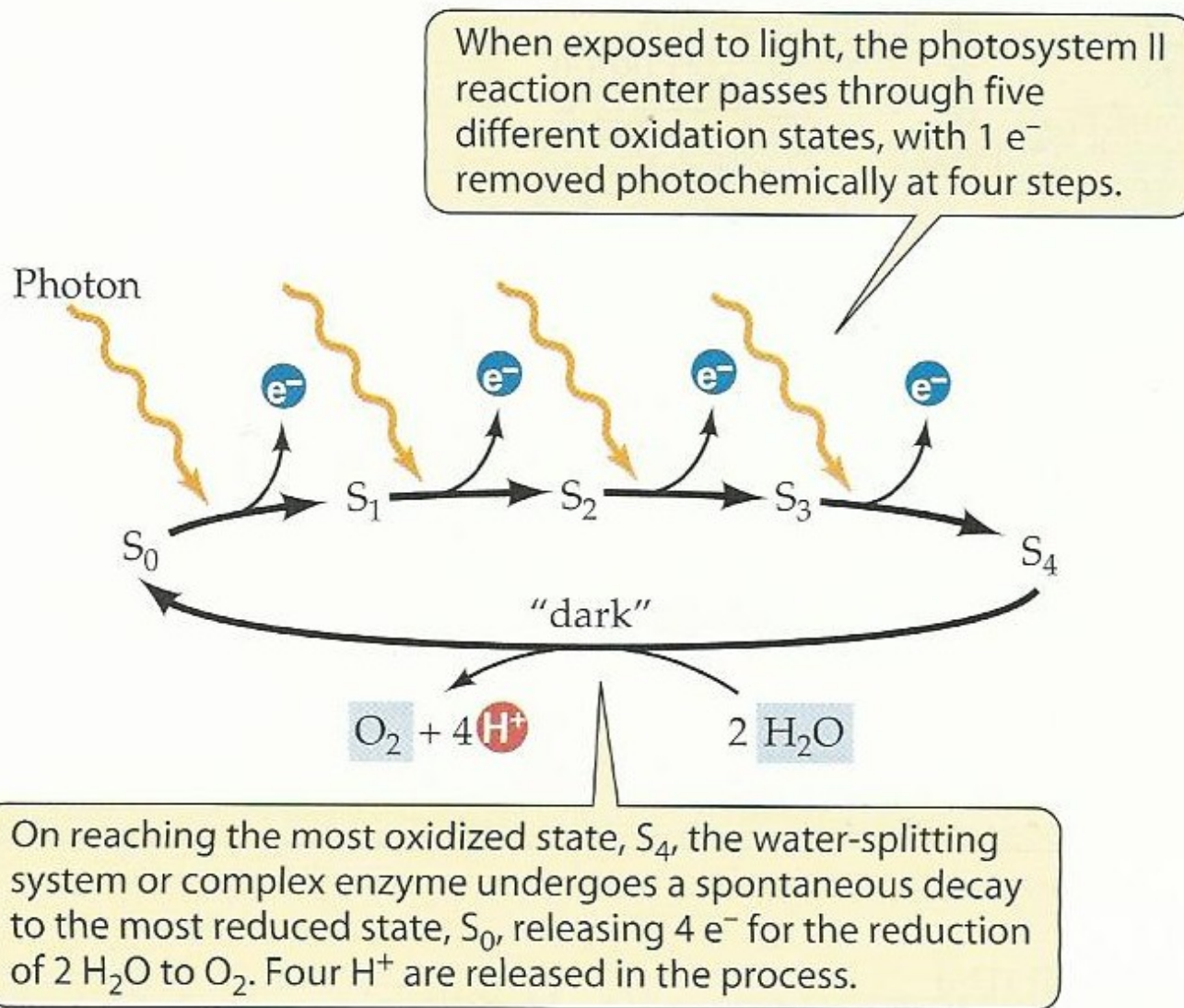
❖ Επίσης στην επικράτεια **αρχαία** το *Halobacterium halobium*

### 3.1.2. Η «Z» φωτοσύνθεση στα κυανοβακτήρια



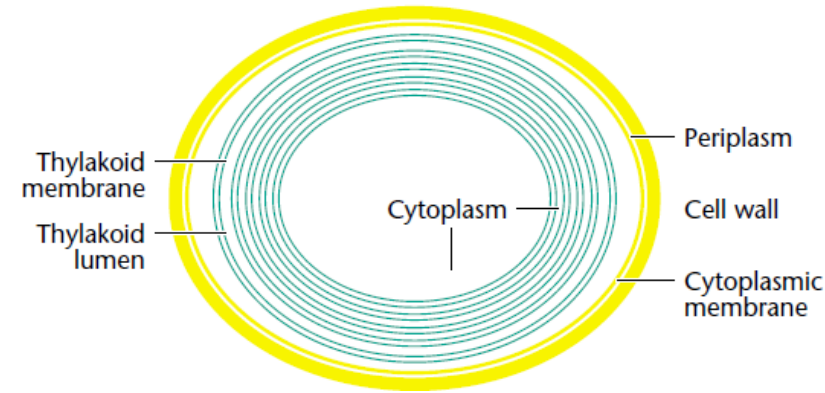
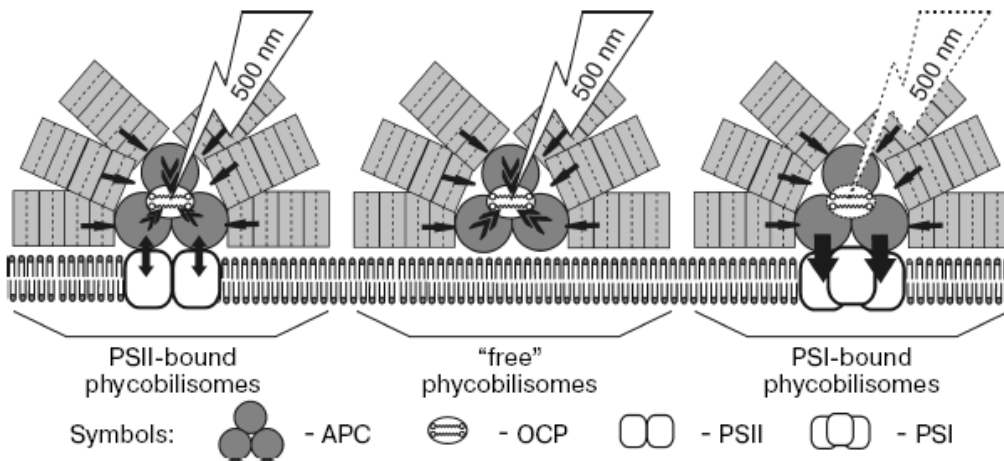
**Figure 9.6 Electron flow in reaction center of a cyanobacterium**

A cyanobacterium has two photosystems, designated photosystems I and II (PSI and PSII). BPh, bacterioopheophytin;  $\text{Q}_A$ ,  $\text{Q}_B$ , PQ, plastoquinones; FeS, iron-sulfur center; PC, plastocyanin;  $\text{F}_A$ ,  $\text{F}_B$ , iron-sulfur centers; Fd, ferredoxin; Fp(FAD), the flavoprotein enzyme ferredoxin-NADP<sup>+</sup> reductase.



**Figure 9.7 Photolysis reaction of photosystem II**  
 Evolution of one molecule of oxygen requires the stepwise accumulation of four oxidizing equivalents in photosystem II.

### 3.1.3. Φυκοβιλίνες και Φυκοβιλισώματα



Οι φυκοβιλίνες είναι οι συστατικές πρωτεΐνες των φυκοβιλισωμάτων, συμπλεγμάτων πρωτεϊνών επί των *θυλακοειδών μεμβρανών* των κυανοβακτηρίων και ερυθροφυκών. Κάθε φυκοβιλιπρωτεΐνη έχει μια συγκεκριμένη μέγιστη απορρόφηση και εκπομπή φθορισμού στην ορατή περιοχή του φωτός.

Η παρουσία τους και η συγκεκριμένη διάταξη εντός των φυκοβιλισωμάτων επιτρέπει την απορρόφηση και μονόδρομη μεταφορά της ενέργειας του φωτός σε χλωροφύλλη *a* του φωτοσυστήματος II.

Με τον τρόπο αυτό, τα κύτταρα μπορούν να επωφεληθούν από τα διαθέσιμα μήκη κύματος του φωτός (στο εύρος 500-650 nm), τα οποία είναι απρόσιτα στη χλωροφύλλη, και να χρησιμοποιήσουν την ενέργειά τους για τη φωτοσύνθεση.

Η ιδιότητα αυτή αξιοποιείται από τα κυανοφύκη σε μεγαλύτερα βάθη όπου τα μήκη κύματος του φωτός είναι μικρότερα.

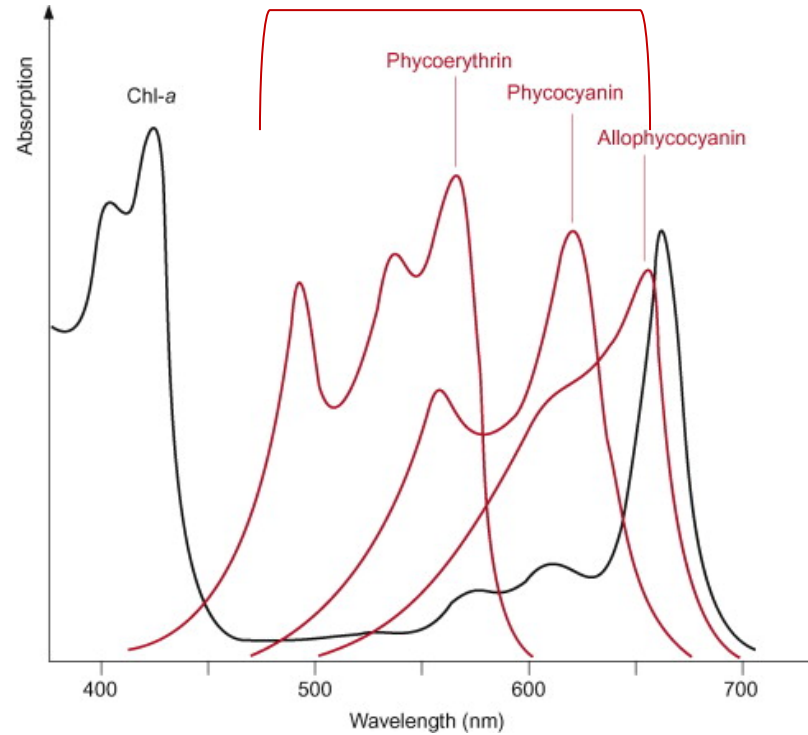
[http://www.synechocystis.asu.edu/pdf/photosyn\\_%20resp.pdf](http://www.synechocystis.asu.edu/pdf/photosyn_%20resp.pdf)



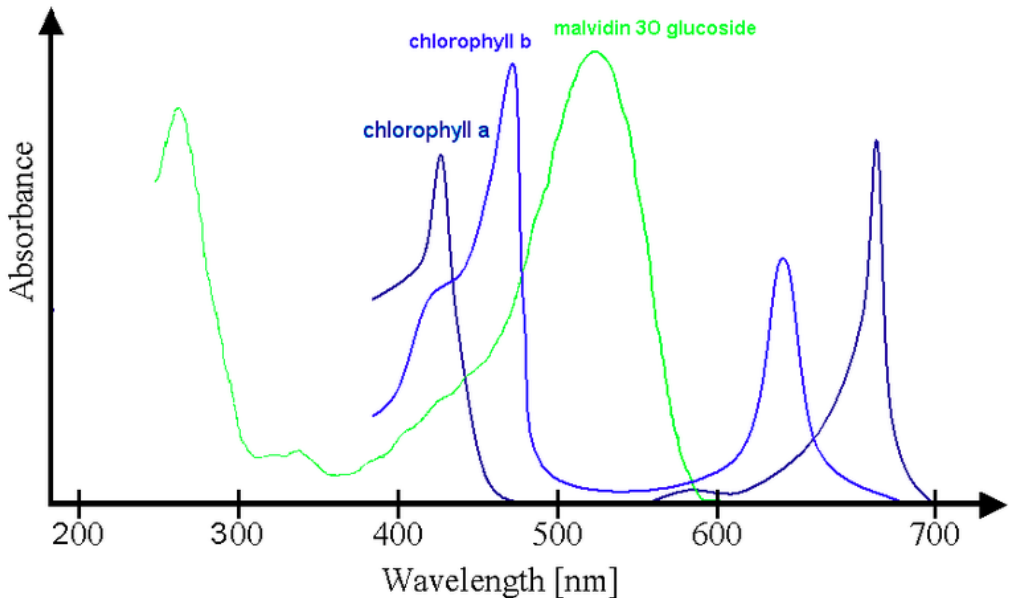
# Σύγκριση φασμάτων απορρόφησης

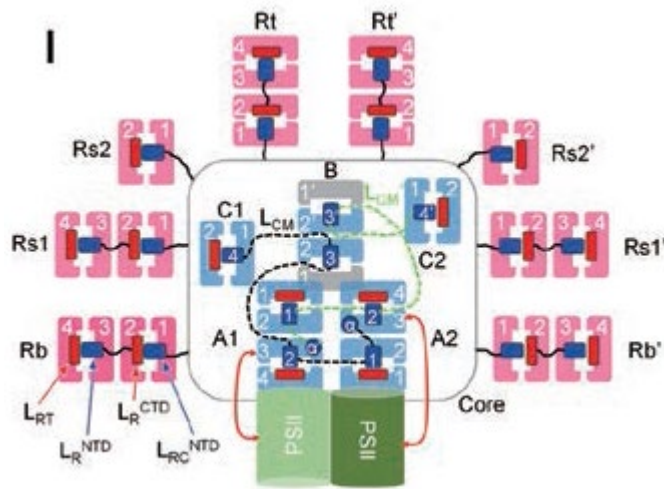
## Φυκοβιλινών

<https://ars.els-cdn.com/content/image/3-s2.0-B9780123849861000028-f02-16-9780123849861.jpg>



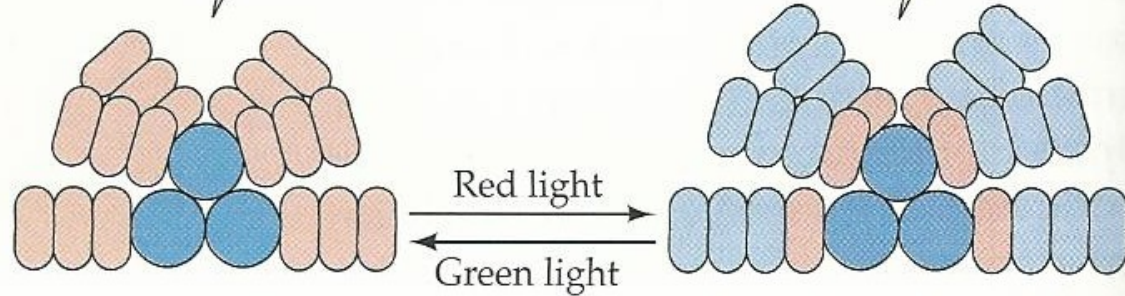
## χλωροφύλλης a, b και ανθοκυανίνης





When cells are grown in green light, the rods are predominantly composed of the red pigment phycoerythrin.

When grown in red light, the rods are predominantly made up of the blue pigment phycocyanin.



**Figure 9.9 Chromatic adaptation of a phycobilisome**  
 In some bacterial species, the composition of phycobilisomes can be altered by changing the wavelength of light provided for growth. This scheme shows chromatic adaptation in *Fremyella diplosiphon*. Reproduced with permission. Arthur Grossman, *Microbiological Reviews*, 57:725–749.

Η σύσταση των φυκοβιλινών μπορεί να αλλάζει ανάλογα με το μήκος κύματος που φτάνει στον οργανισμό. Σκοπός η καλύτερη μεταφορά ενέργειας στη χλωροφύλλη a.

## 3.2. Ανοξική Φωτοσύνθεση

## 3.2.1. Ταξινόμηση των φωτοσυνθετικών βακτηρίων

❖ 5 ομάδες στην επικράτεια (domain) **βακτήρια** (16S rRNA)

• Αεροβική φωτοσύνθεση

1. Κυανοβακτήρια και προχλωρόφυτα

• Ανοξική φωτοσύνθεση

2. Πορφυρά βακτήρια

3. Πράσινα θείο βακτήρια

4. Ηλιοβακτήρια

5. Πράσινα (μη θείο) βακτήρια

❖ Επίσης στην επικράτεια **αρχαία** το *Halobacterium halobium*

# Ανοξική φωτοσύνθεση

## 3.2.2. Γενικά χαρακτηριστικά:

### 1. Ομάδες μικροοργανισμών

Σχεδόν όλα τα βακτήρια που φωτοσυνθέτουν πλην των κυανοβακτηρίων.

- **Πορφυρά** θείο βακτήρια (π.χ. *Chromatium*) και
- **Πορφυρά** μη θείο βακτήρια (π.χ. *Rhodobacter*, *Rhodospirillum*).  
Χρησιμοποιούν **πορφυρή καρτενοειδή χρωστική**.
  
- **Πράσινα** θείο βακτήρια (π.χ. *Chlorobium*) και
- **Πράσινα** μη θείο βακτήρια (π.χ. *Chloroflexus*). Χρησιμοποιούν **πράσινη χλωροφύλλη**.
  
- Ηλιοβακτήρια. Χρησιμοποιούν αποκλειστικά βακτηριοχλωροφύλλη g.
  
- Αρχαίο που ονομάζεται *Halobacterium*. **Ηλιακή αντλία πρωτονίων:**  
Μοναδικός πρωτόγονος τύπος φωτοσύνθεσης. Δημιουργεί κλίση πρωτονίων για τη δημιουργία ATP.

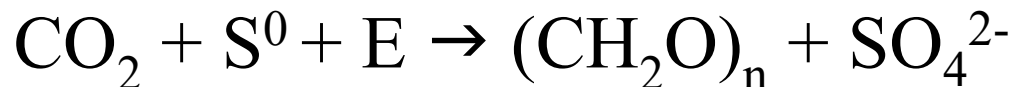
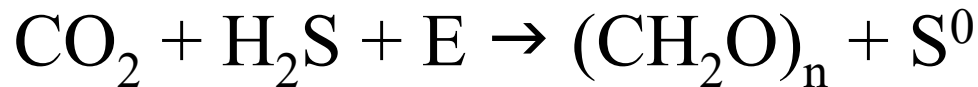
### 3.2.2. Ανοξική φωτοσύνθεση, γενικά χαρακτηριστικά

#### 2. Δότες ηλεκτρονίων-όχι το H<sub>2</sub>O

➤ H<sub>2</sub>S, S, Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (θειοθειικό νάτριο) και H<sub>2</sub> στα πράσινα και πορφυρά θειοβακτήρια

➤ H<sub>2</sub> ή οργανικές ενώσεις (φουμαρικό, ισοπροπανόλη κλπ) στα πράσινα και πορφυρά **μη** θειοβακτήρια

Αντίδραση:  $6 \text{CO}_2 + 12 \text{H}_2\mathbf{A} + \text{E} \text{ ----> } \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O} + 6 \text{H}_2\text{O} + 12 \mathbf{A}$   
Το **A** δεν είναι O



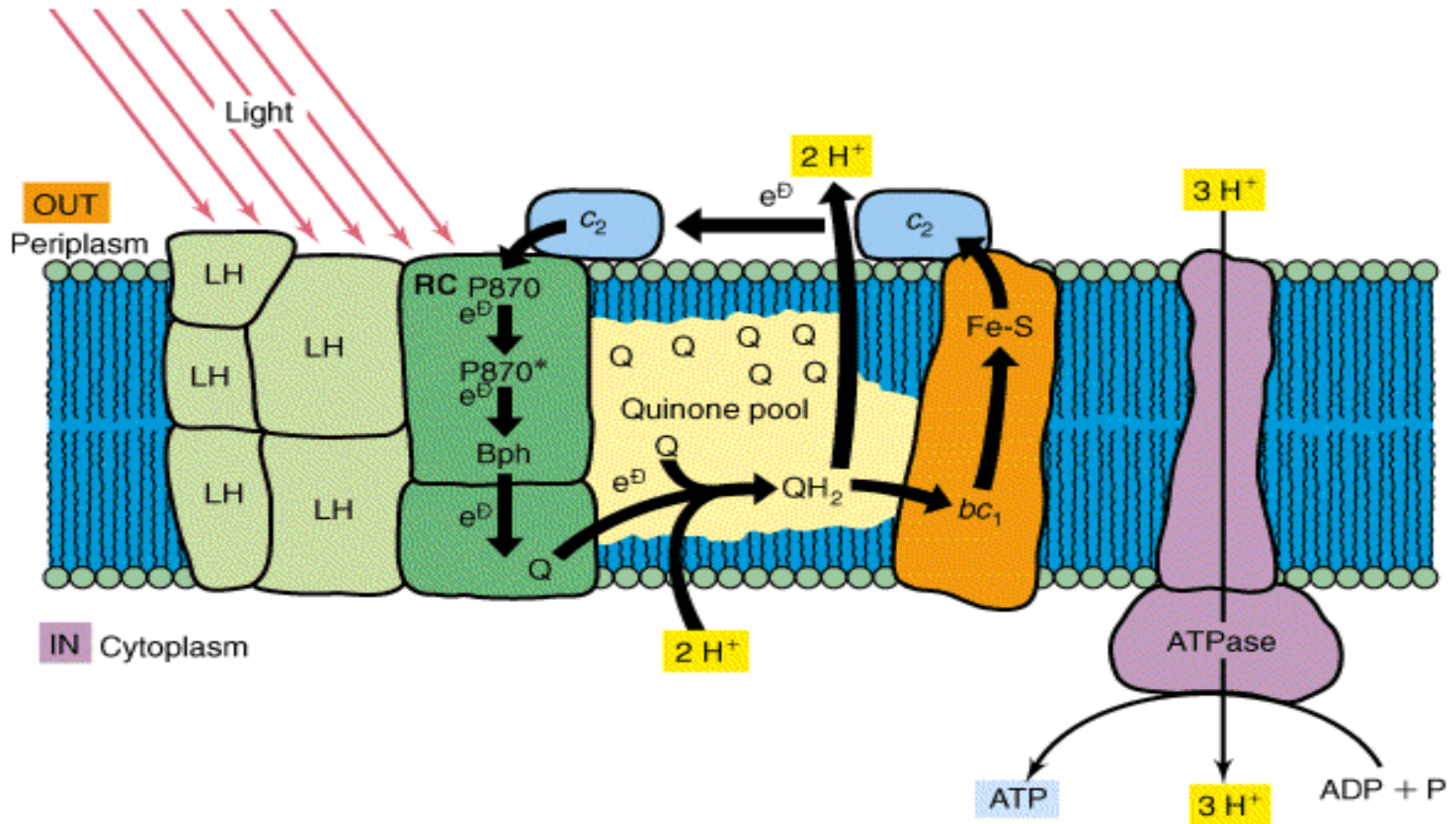
### 3.2.2. Ανοξική φωτοσύνθεση, γενικά χαρακτηριστικά

#### 3. Μόνο **ένα** φωτοσύστημα (PS)

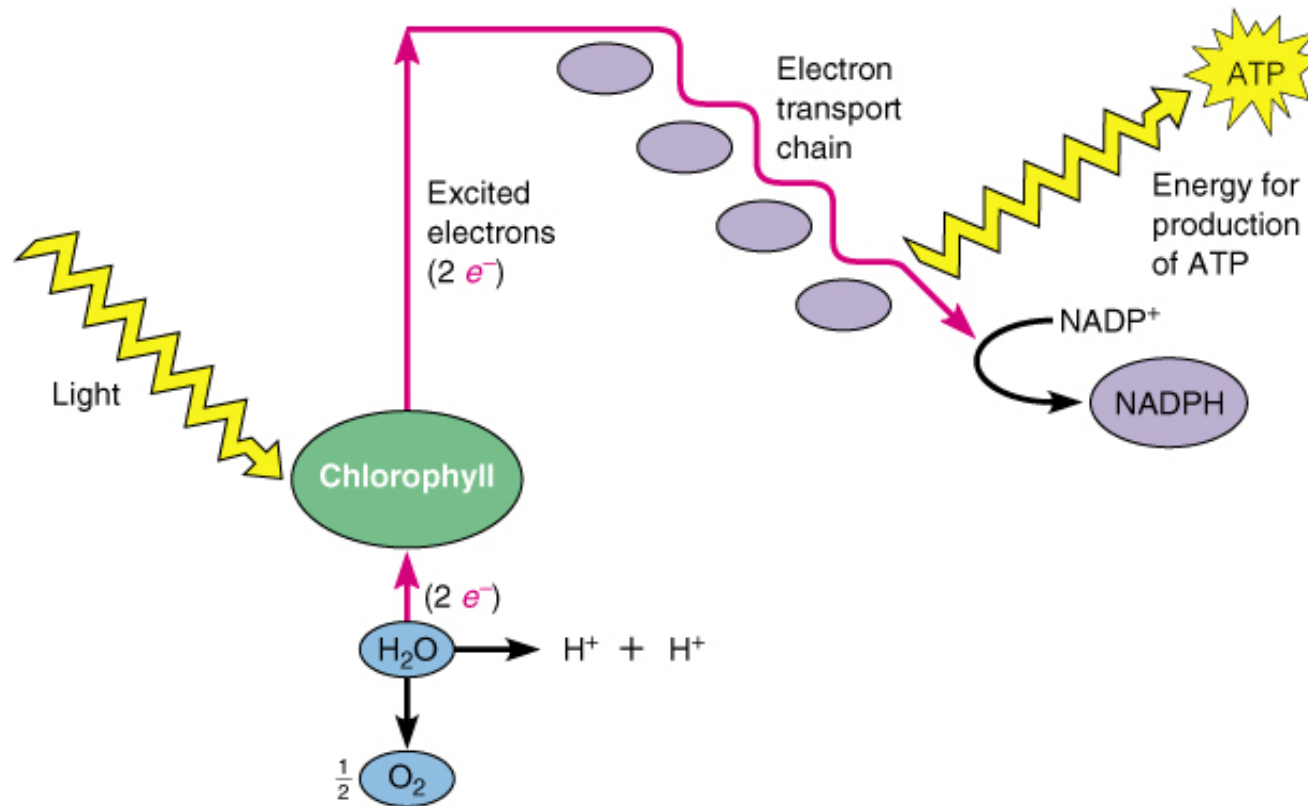
- Χρησιμοποιούν βακτηριοχλωροφύλλη αντί της χλωροφύλλης.
- Στα **πράσινα** βακτήρια το φωτοσύστημα είναι όπως το PSI.
- Στα **πορφυρά** βακτήρια το φωτοσύστημα είναι όπως το PSII.
- Μπορούν να χρησιμοποιούν το PS για την παραγωγή ATP με **κυκλικό** τρόπο.

#### 4. Κύρια λειτουργία είναι η παραγωγή του ATP μέσω **κυκλικής φωτοφωσφορυλίωσης**

### 3.2.3. Ανοξική κυκλική φωτοσύνθεση στα πορφυρά μη θείο βακτήρια





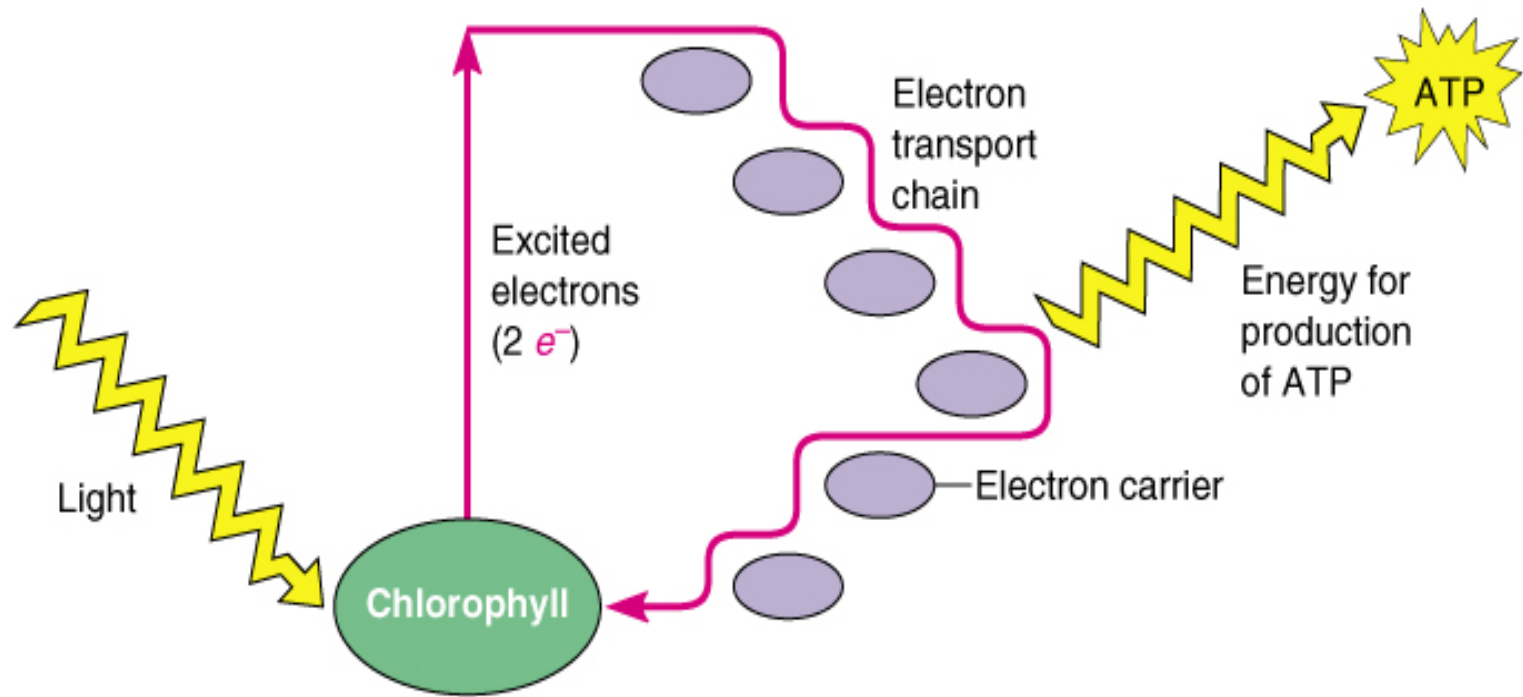


(b) Noncyclic photophosphorylation

Copyright © 2001 Benjamin Cummings, an imprint of Addison Wesley Longman, Inc.

### 3.2.4. Μη κυκλική («Z»)φωτοσύνθεση:

Ροή ηλεκτρονίων από το PSII στο PSI  
 Παραγωγή ATP και NADPH



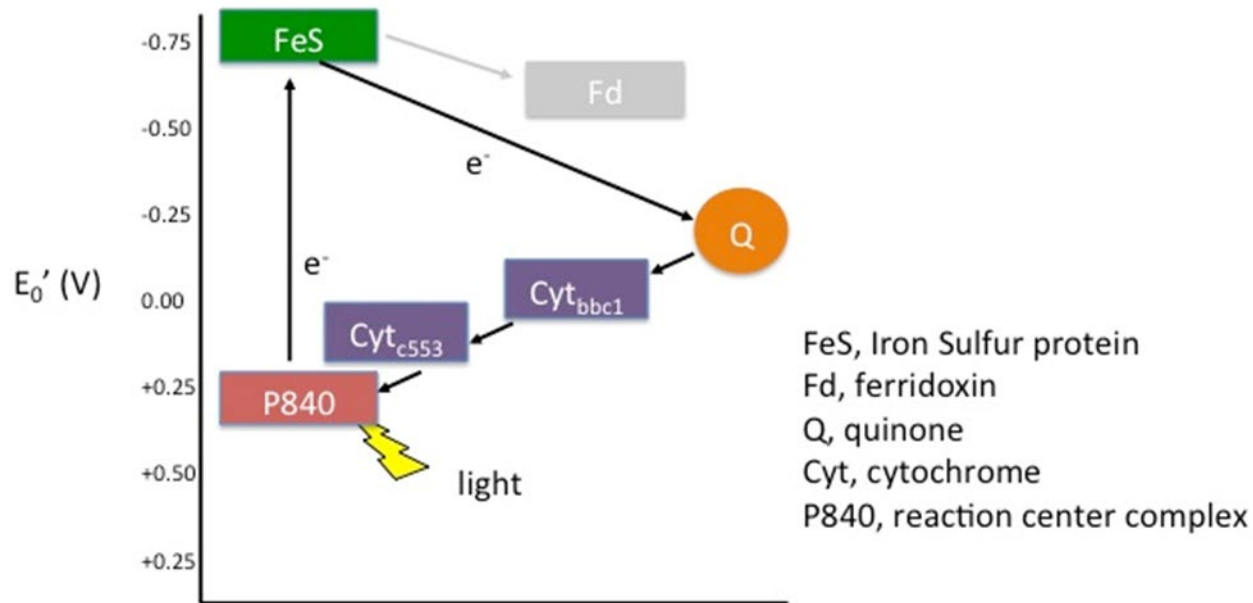
**(a)** Cyclic photophosphorylation

Copyright © 2001 Benjamin Cummings, an imprint of Addison Wesley Longman, Inc.

### 3.2.5. Κυκλική φωτοσύνθεση:

Ροή ηλεκτρονίων εντός του PSI  
Παραγωγή μόνο ATP

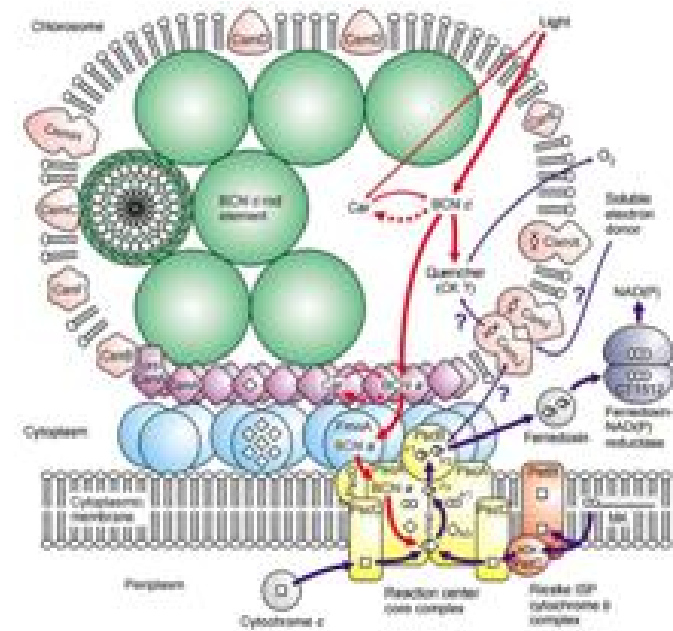
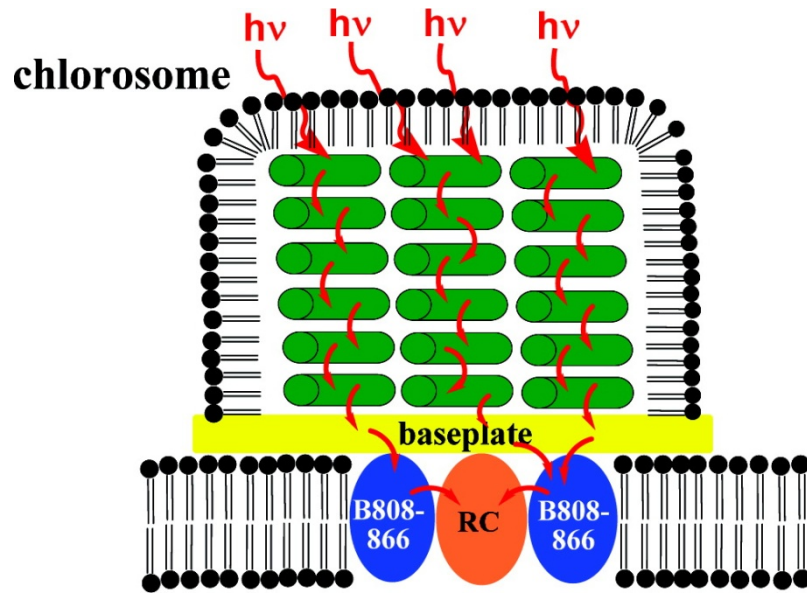
## Cyclic photophosphorylation:



**Γενικευμένη κυκλική ροή ηλεκτρονίων στην ανοξική φωτοσύνθεση.** Το κέντρο αντίδρασης P840 απορροφά την ενέργεια του φωτός και διεγείρεται. Το διεγερμένο ηλεκτρόνιο εκτοξεύεται και χρησιμοποιείται για τη αναγωγή μιας πρωτεΐνης πλειάδων FeS αφήνοντας ένα οξειδωμένο P840. Το ηλεκτρόνιο μεταφέρεται από την FeS σε κινόνη, κατόπιν σε μια σειρά κυτοχρωμάτων και τέλος στο κέντρο αντίδρασης P840. Η διαδικασία είναι κυκλική. Σημειώστε το γκρίζο βέλος από την FeS προς μια φερρεδοξίνη (Fd), επίσης σε γκρι. Αυτό αντιπροσωπεύει μια εναλλακτική ροή ηλεκτρονίων και θα συζητηθεί παρακάτω στη **μη κυκλική** φωτοφωσφορυλίωση. Το ηλεκτρόνιο που αρχικά φεύγει από το κέντρο αντίδρασης P840 δεν είναι απαραίτητα το ίδιο ηλεκτρόνιο που τελικά βρίσκει τον δρόμο του πίσω για να ανάγει το οξειδωμένο P840.

[https://bio.libretexts.org/Courses/University\\_of\\_California\\_Davis/BIS\\_2A: Introductory Biology \(Easlon\)/Readings/11.3: Photophosphorylation: Anoxygenic and Oxygenic](https://bio.libretexts.org/Courses/University_of_California_Davis/BIS_2A:_Introductory_Biology_(Easlon)/Readings/11.3:_Photophosphorylation:_Anoxygenic_and_Oxygenic)

### 3.2.6. Φωτοσύνθεση στα πράσινα θείο βακτήρια-χλωρόσωμα

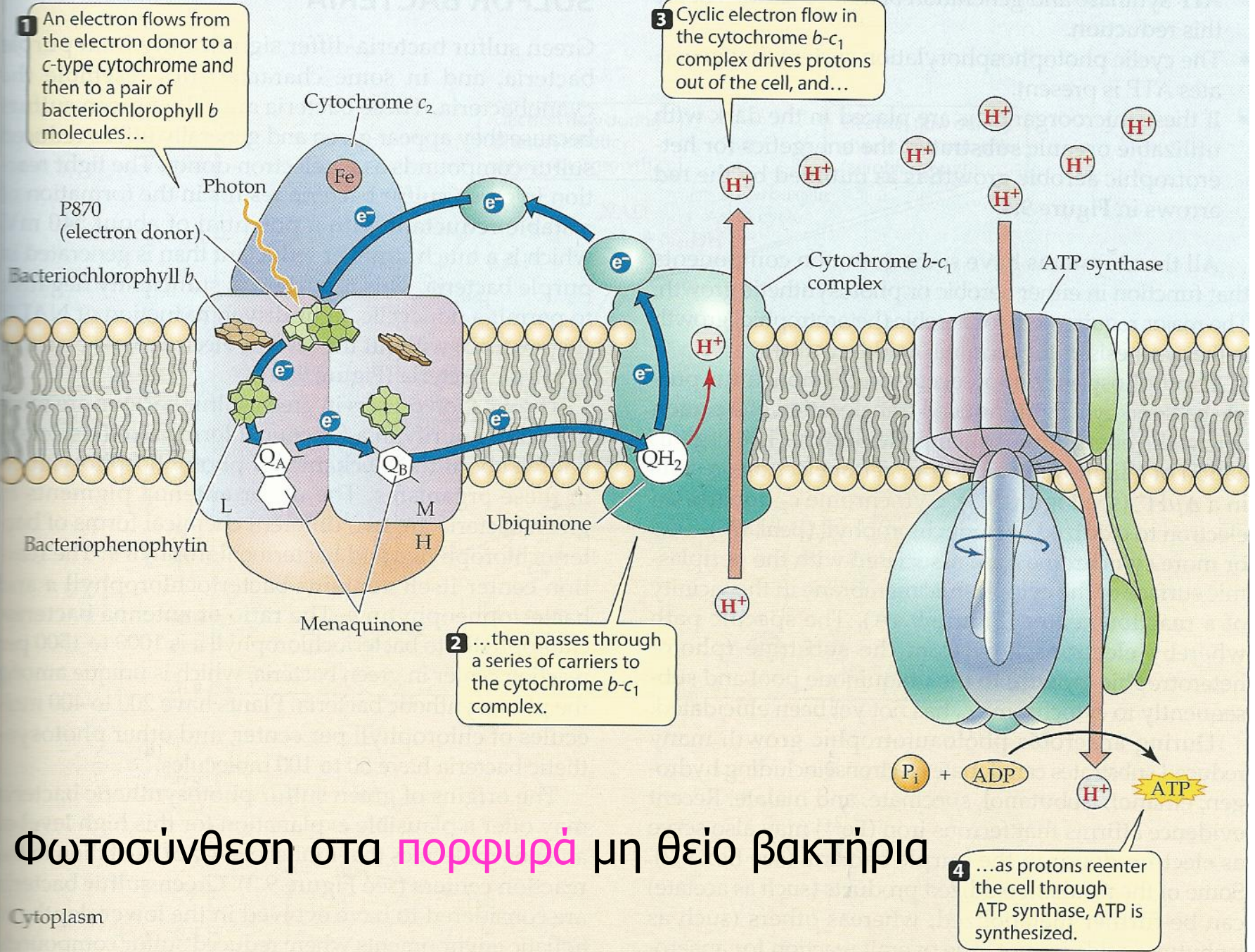


Τα χλωροσώματα συλλαμβάνουν την ενέργεια του φωτός και τη μεταφέρουν στο κέντρο αντίδρασης για τη φωτοσύνθεση.

<http://www.physics.purdue.edu/~sergei/Photosynthesis>

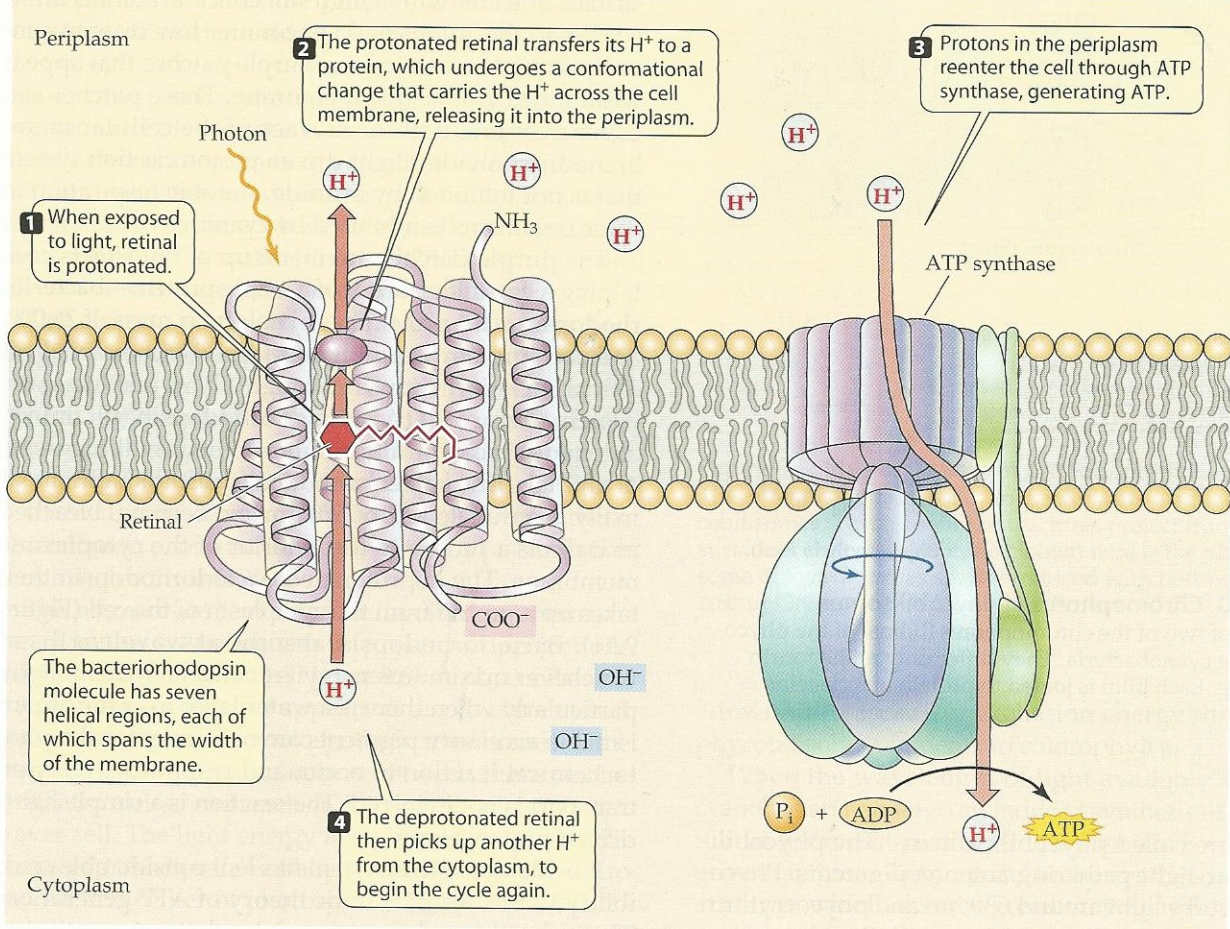
<http://phys.org/news/2011-03-neutron-analysis-yields-insight-bacteria.html>

Outside of cell



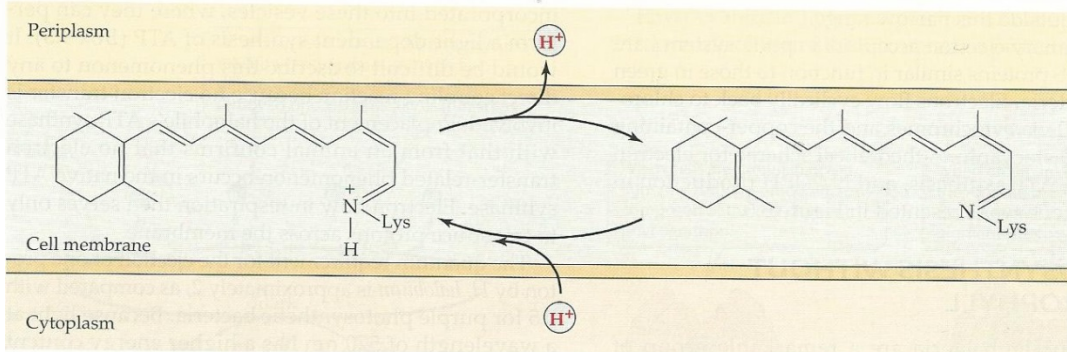
# Φωτοσύνθεση στα πορφυρά μη θείο βακτήρια

Cytoplasm



### 3.2.7. Φωτοσύνθεση στο αρχαίο *Hallobium*

**Figure 9.11 Light-driven proton pump of halophilic bacteria**  
 (A) The light-driven proton pump in the membranes of halophilic (salt-loving) bacteria consists of bacteriorhodopsin, a pigmented protein molecule, to which is attached a retinal molecule. (B) The chemical reactions of retinal underlying the pumping mechanism. No electron transport is involved in this system.



### 3.2.8. Διαφορές της ανοξικής βακτηριακής φωτοσύνθεσης από την αεροβική:

1. Το  $H_2O$  δεν είναι η πηγή των ηλεκτρονίων στην ανοξική.
2. Το  $O_2$  δεν είναι ποτέ προϊόν.
3. Οι βακτηριακές χλωροφύλλες απορροφούν σε μεγαλύτερα μήκη κύματος.
4. Η αφομοίωση του  $CO_2$  είναι παρόμοια.
5. Υπάρχει κυρίως κυκλική φωτοφωσφορυλίωση.

### 3.2.9. Σύνθεση του **NADPH** από τα βακτήρια

1. Παρουσία  $H_2$  και υδρογονάσης:  $H_2 + NADP^+ \rightarrow NADPH + H^+$

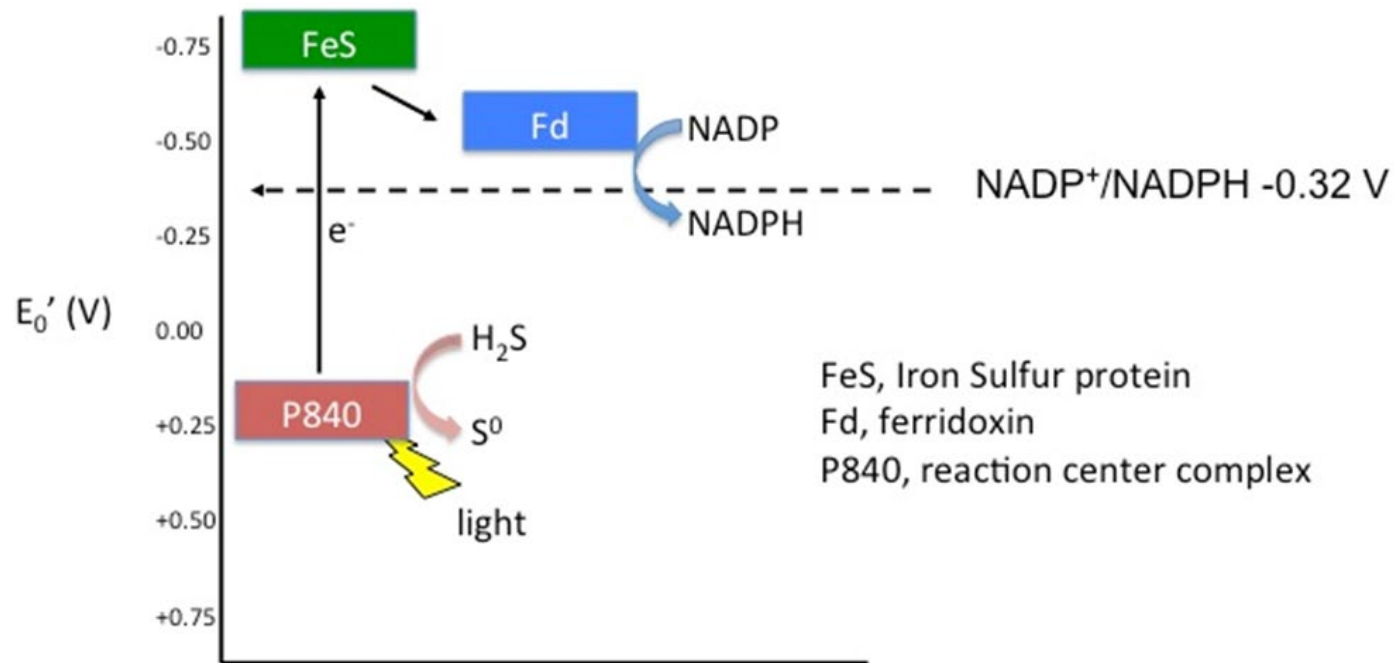
2. Με αναστροφή της ροής  $e^-$  στην αλυσίδα μεταφοράς  $e^-$  :



3. Απλή, **μη κυκλική**, φωτοσυνθετική ροή  $e^-$



## Non-cyclic photophosphorylation:



### 3. Απλή, μη κυκλική, φωτοσυνθετική ροή $e^-$

**Μη κυκλική ροή ηλεκτρονίων στη ανοξική φωτοσύνθεση.** Το κέντρο αντίδρασης P840 απορροφά την ενέργεια του φωτός και ενεργοποιείται. Το εκπεμπόμενο ηλεκτρόνιο ανάγει μια πρωτεΐνη πλειάδων FeS που με τη σειρά της ανάγει τη φερρεδοξίνη. Η ανηγμένη φερριδοξίνη (Fd<sub>red</sub>) μπορεί τώρα να ανάγει το  $NADP^+$  προς  $NADPH$ . Τα ηλεκτρόνια πρέπει να αντικατασταθούν στο P840, κάτι που απαιτεί εξωτερικό δότη ηλεκτρονίων. Σε αυτό το παράδειγμα, το  $H_2S$  χρησιμεύει ως δότης ηλεκτρονίων. Το παράδειγμα **δεν συνεχίζει σε «Z» φωτοσύνθεση.**

[https://bio.libretexts.org/Courses/University\\_of\\_California\\_Davis/BIS\\_2A:\\_Introductory\\_Biology\\_\(Easlon\)/Readings/11.3:\\_Photophosphorylation:\\_Anoxygenic\\_and\\_Oxygenic](https://bio.libretexts.org/Courses/University_of_California_Davis/BIS_2A:_Introductory_Biology_(Easlon)/Readings/11.3:_Photophosphorylation:_Anoxygenic_and_Oxygenic)

### 3.2.10. Σύγκριση δυναμικών των ηλεκτρονίων στην αεροβική και ανοξική φωτοσύνθεση

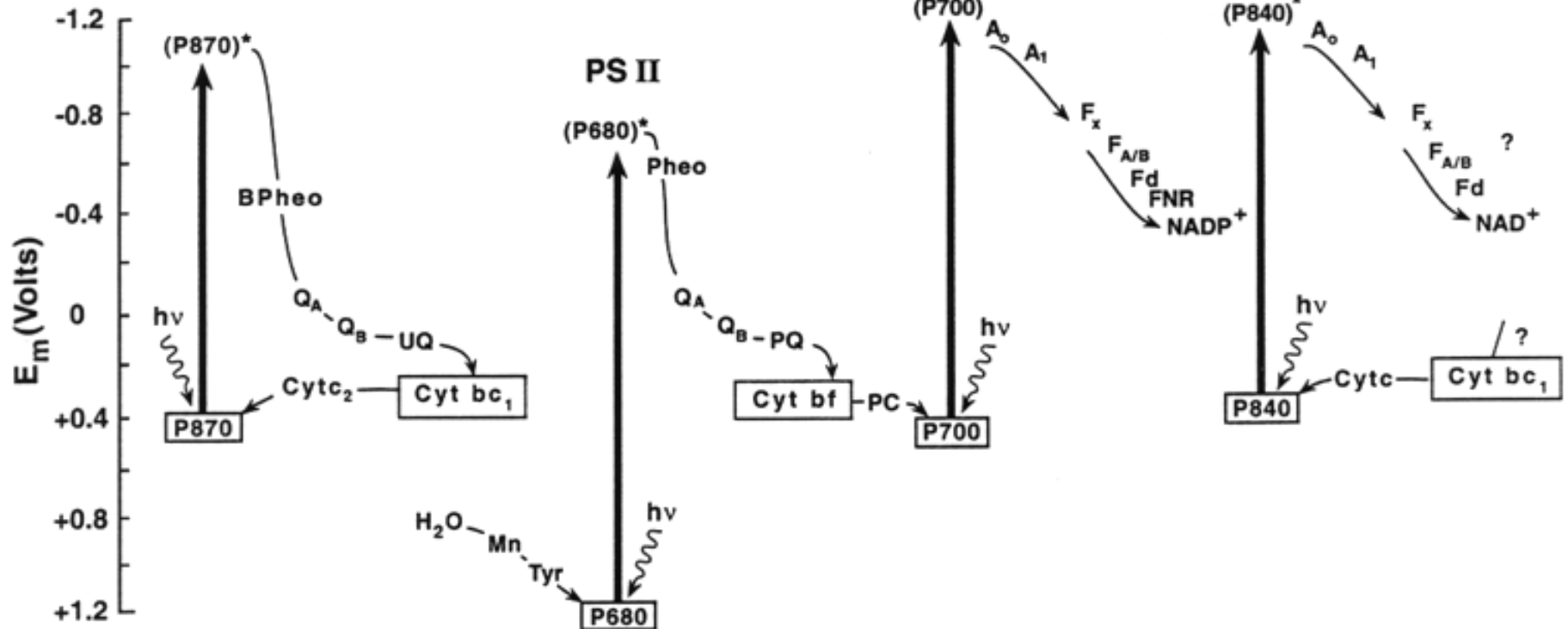
#### Pheophytin-Quinone Type Reaction Centers

#### Iron-Sulfur Type Reaction Centers

Purple & Filamentous Green Bacteria

Plants, Algae and Cyanobacteria

Green Sulfur Bacteria & Heliobacteria



## **4. Διατροφικοί τύποι**

## 4. Διατροφικοί τύποι

### Ταξινόμηση των εμβίων με βάση:

Από πού παίρνουν **ενέργεια**;

Φως, ανόργανες ενώσεις, οργανικές ενώσεις

Από πού παίρνουν **άνθρακα**;

$\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$  (ανόργανος), οργανικές ενώσεις (οργανικός)

**Table 27.1** Major Nutritional Modes

Mode	Energy Source	Carbon Source	Types of Organisms
<b>AUTOTROPH</b>			
<b>Photoautotroph</b>	Light	CO <sub>2</sub> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , or related compound	Photosynthetic prokaryotes (for example, cyanobacteria); plants; certain protists (for example, algae)
<b>Chemoautotroph</b>	Inorganic chemicals (such as H <sub>2</sub> S, NH <sub>3</sub> , or Fe <sup>2+</sup> )	CO <sub>2</sub> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , or related compound	Unique to certain prokaryotes (for example, <i>Sulfolobus</i> )
<b>HETEROTROPH</b>			
<b>Photoheterotroph</b>	Light	Organic compounds	Unique to certain aquatic and salt-loving prokaryotes (for example, <i>Rhodobacter</i> , <i>Chloroflexus</i> )
<b>Chemoheterotroph</b>	Organic compounds	Organic compounds	Many prokaryotes (for example, <i>Clostridium</i> ) and protists; fungi; animals; some plants

# Παράδειγμα

## 1. Φυτά

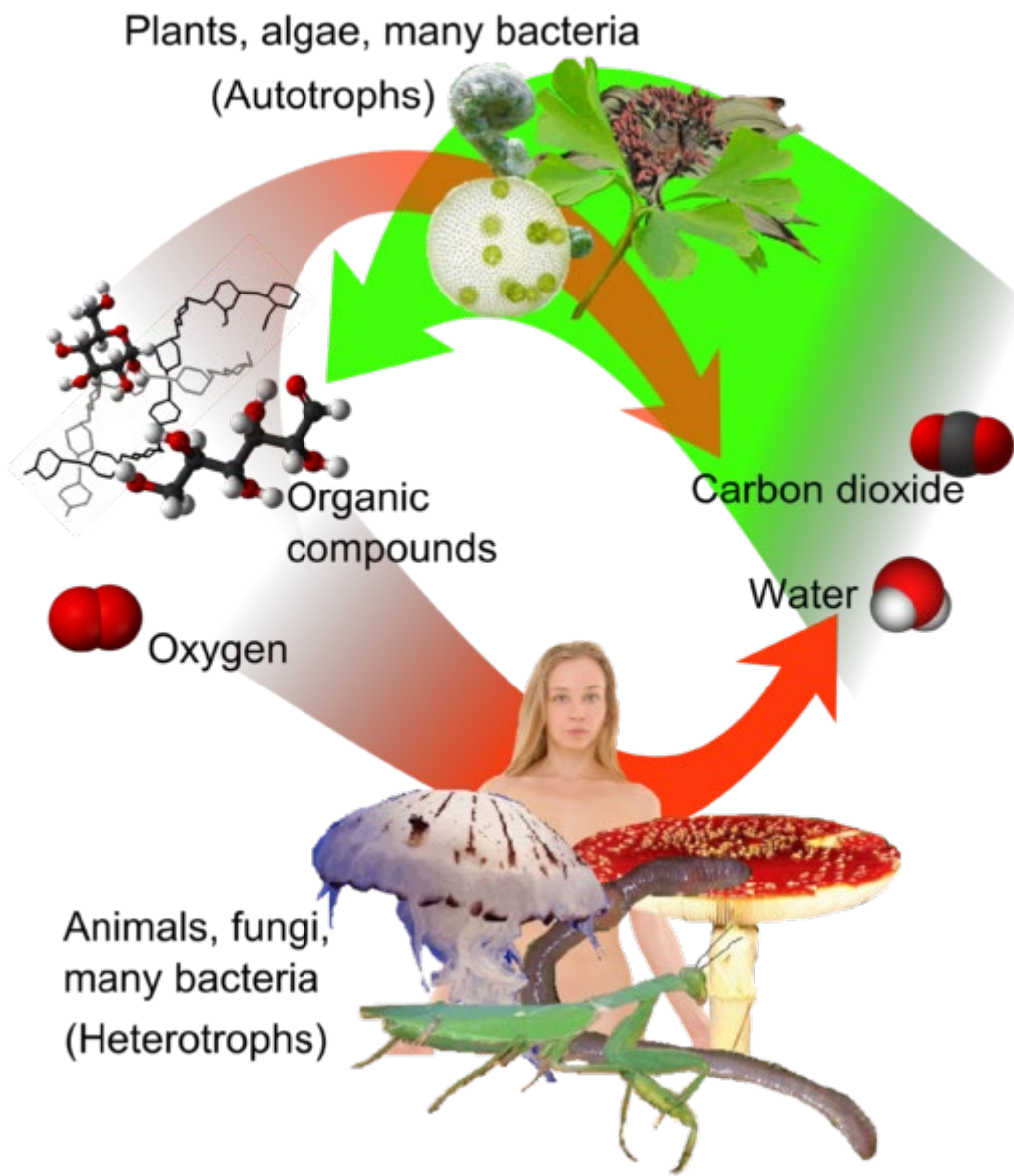
Ενέργεια από το φως (φωτο-)  
Αφομοιώνουν ανόργανο C  
(αυτότροφοι)

## Φωτό-αυτότροφοι

## 2. Θηλαστικά (+μύκητες)

Οργανισμοί που λαμβάνουν  
ενέργεια και άνθρακα από  
οργανικές ενώσεις

## Χημο-ετερότροφοι



ΤΕΛΟΣ