

ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΕΙΑΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΜΙΚΡΟΒΙΟΛΟΓΙΑ

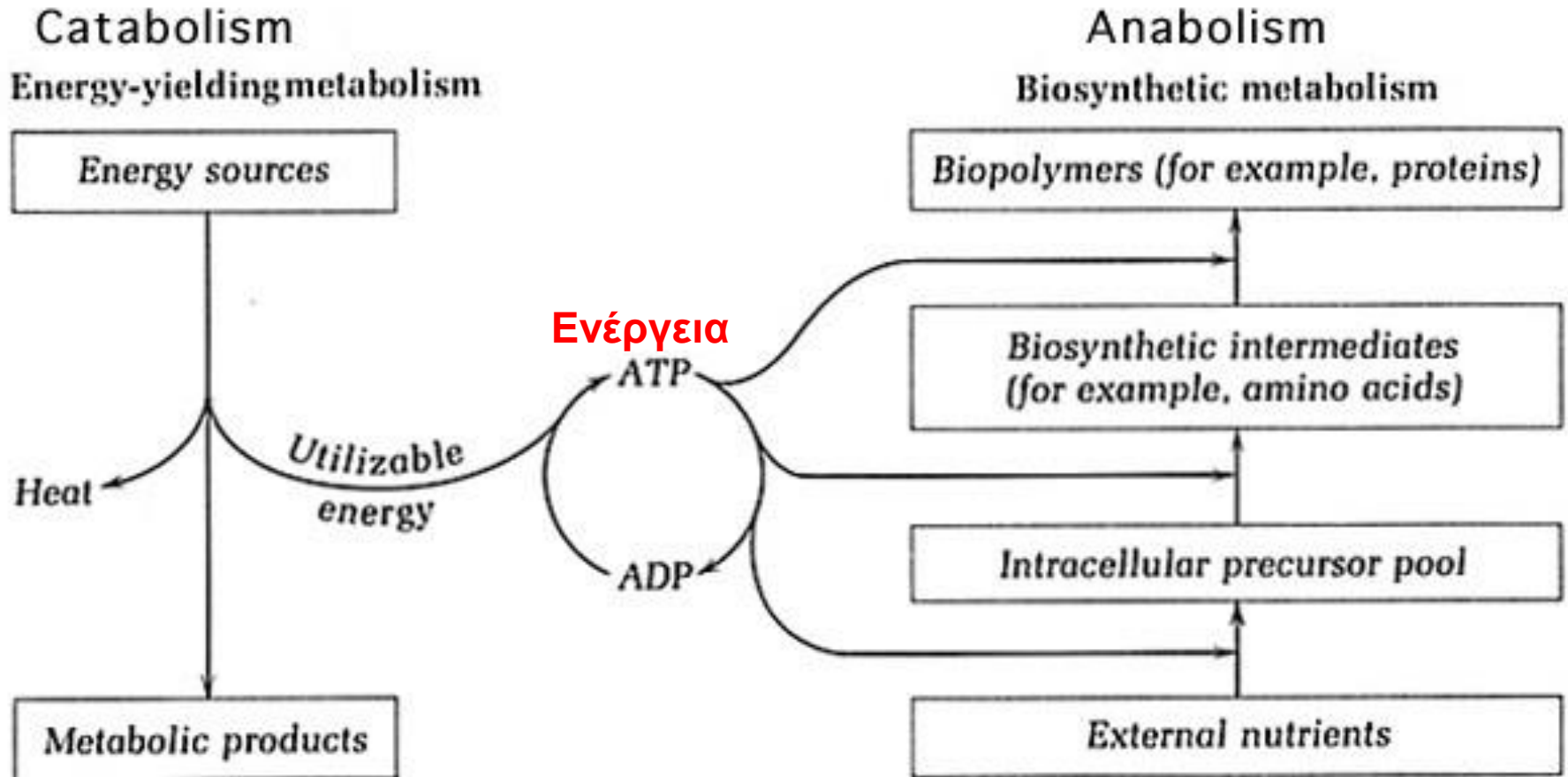
Ενότητα γ΄

Μικροβιακός Μεταβολισμός

ΑΛΕΞΙΟΣ ΒΛΑΜΗΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
avlamis@upatras.gr

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_2 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.).

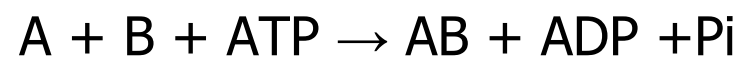
3. Η ενέργεια από την αποδόμηση των ουσιών χρησιμοποιείται για την παραγωγή ATP.

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

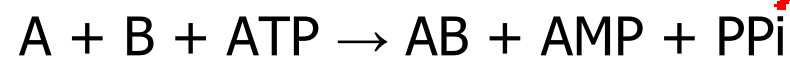
5. Παράγεται επίσης και NADH το οποίο δίνει ηλεκτρόνια στην αναπνευστική αλυσίδα κι έτσι παράγεται περισσότερο ATP.

ATP: το νουκλεοτίδιο που αποθηκεύει την ενέργεια προερχόμενη από τον καταβολισμό

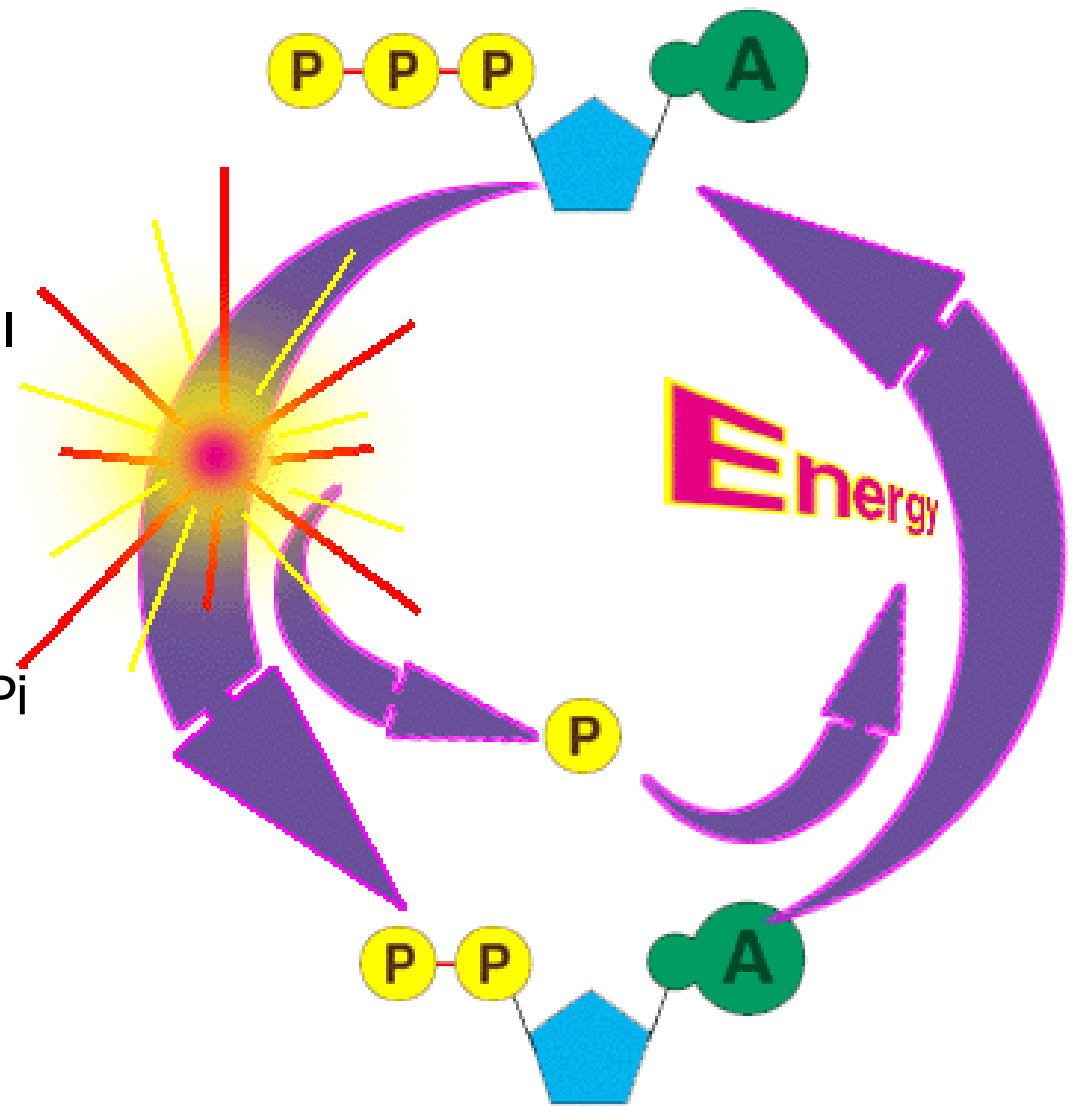
Η ενέργεια χρησιμοποιείται στον αναβολισμό:



ή



Αναγέννηση του ATP από την αδενυλική συνθετάση:



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*.

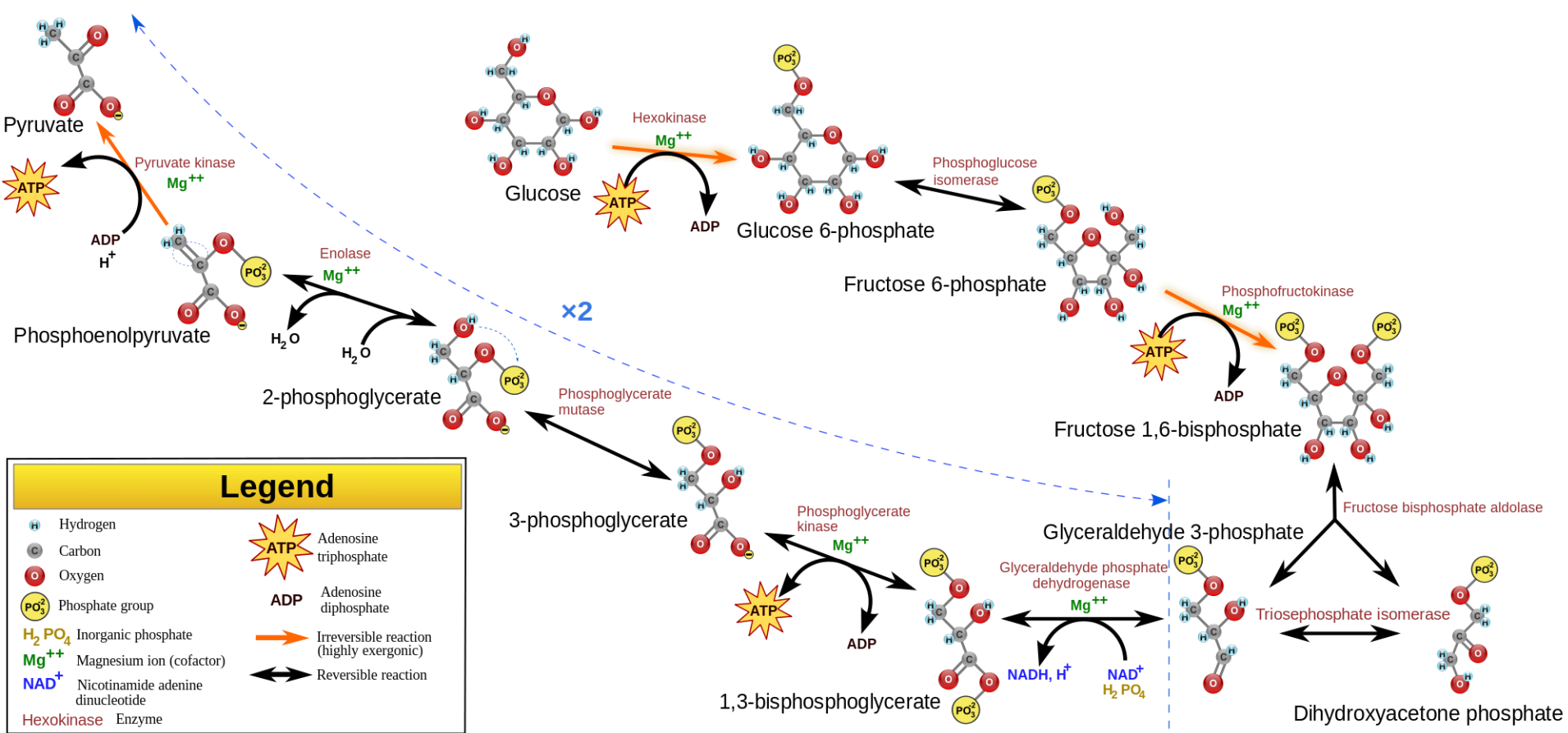
Η διαφορά έγκειται μέσω ποίων ενδιάμεσων καταλήγουμε στην
φωσφορική γλυκεραλδεϋδη και στο **πυροσταφυλικό οξύ**

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⁺
 - 2 ATP

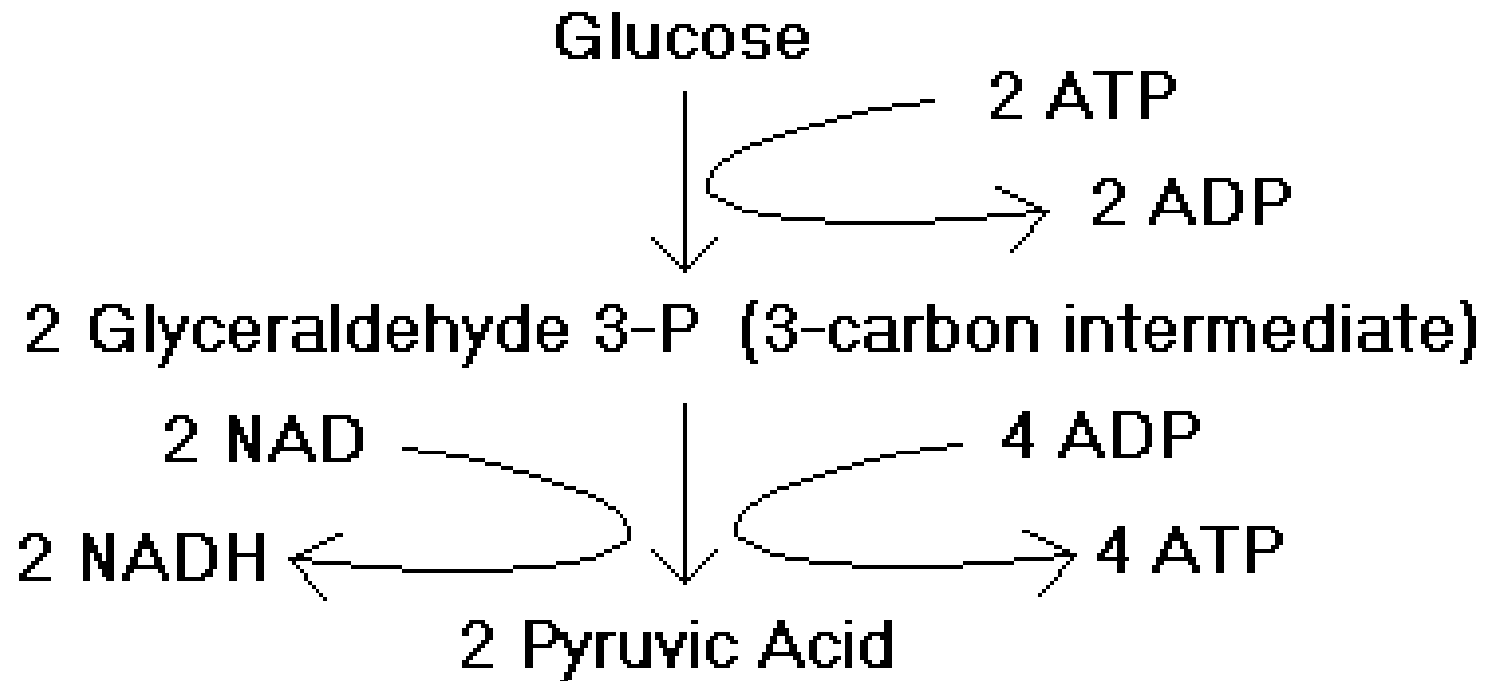
Καταβολισμός: οξείδωση ουσιών (πχ σακχάρων) για παραγωγή ενέργειας

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



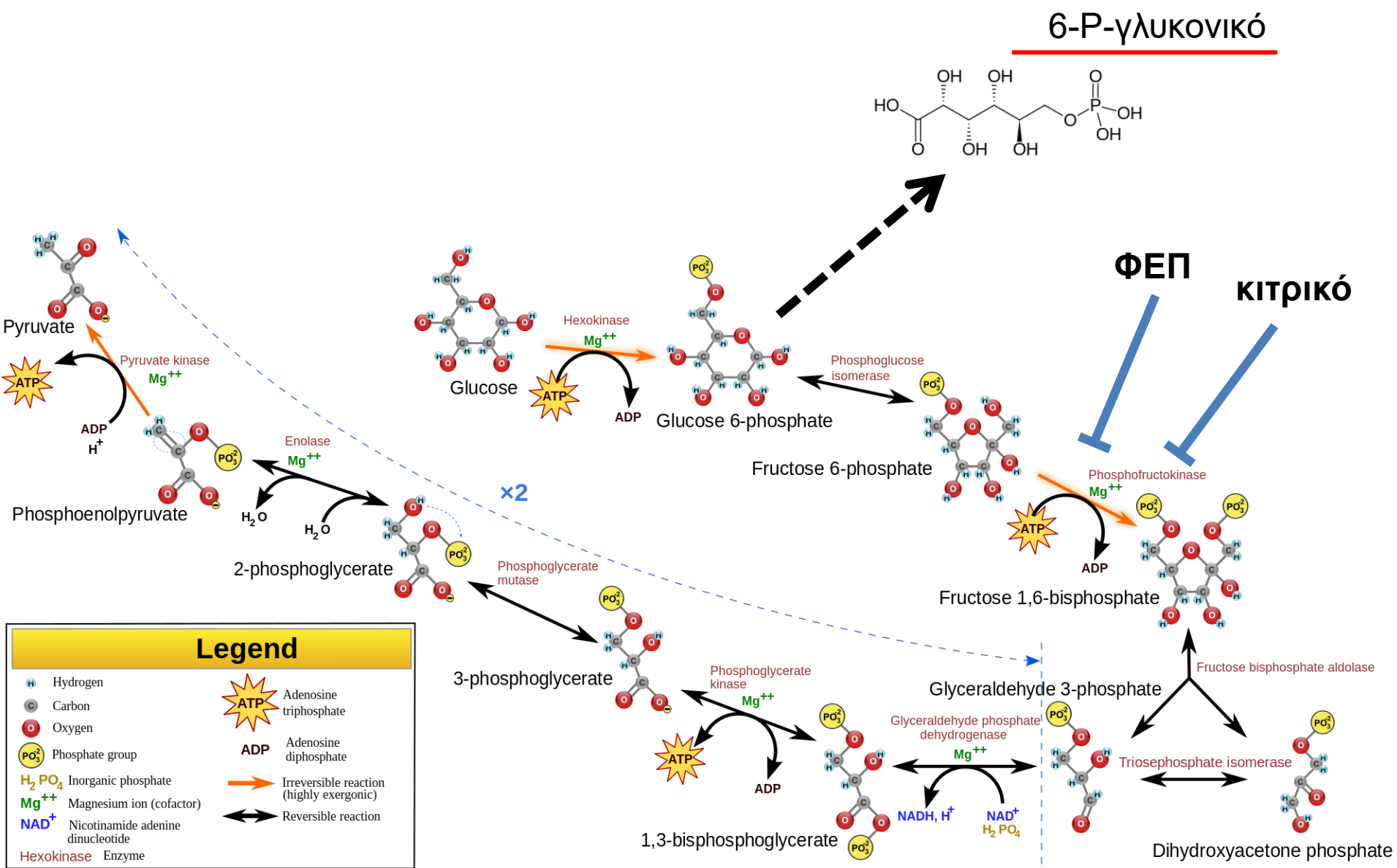
Καταβολική οδός Embden-Meyerhoff-Parnas (EMP)

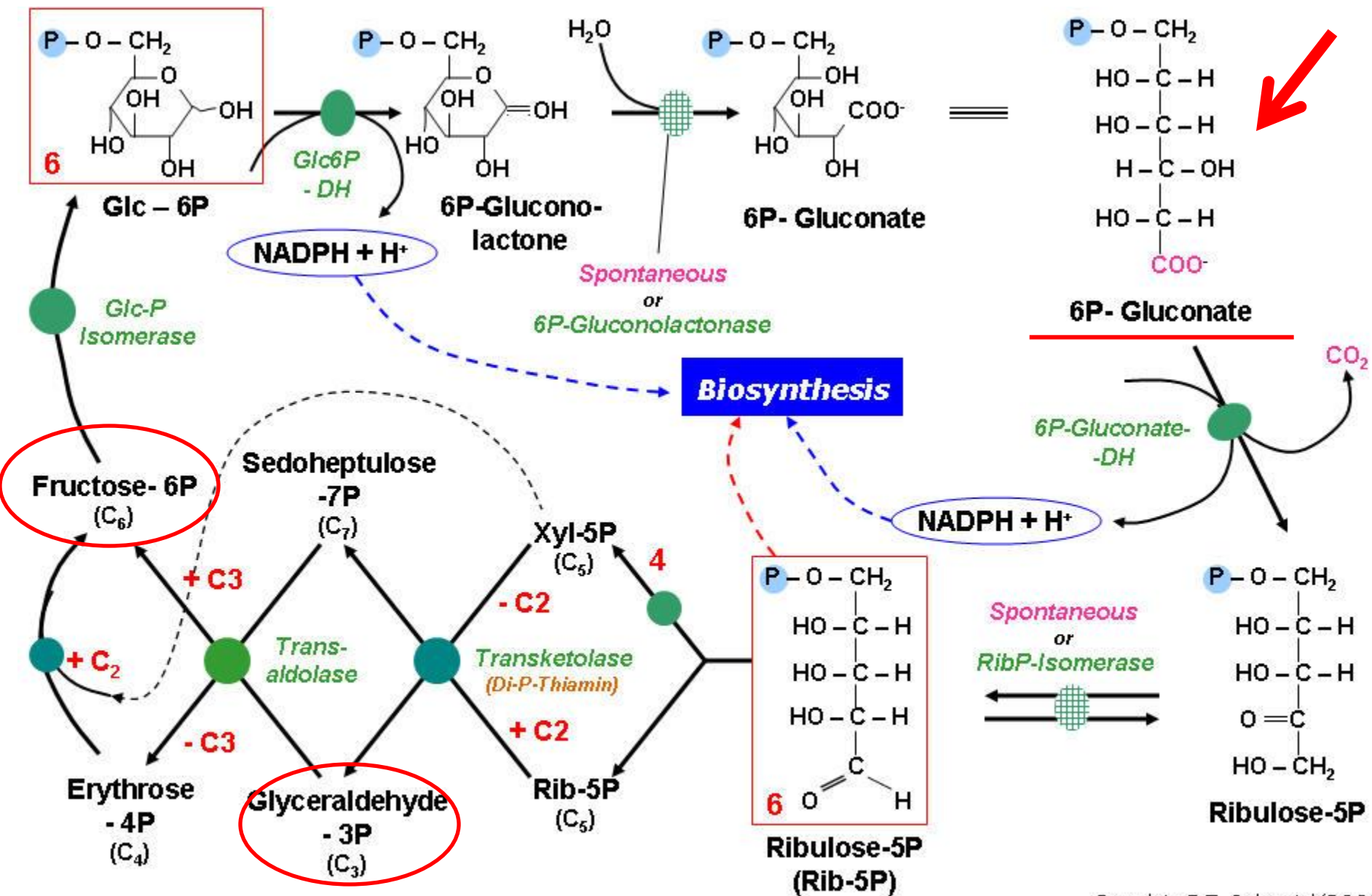
Σύνοψη:



2.1.1.2. Καταβολική οδός φωσφοροπεντοζών (PPP)

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





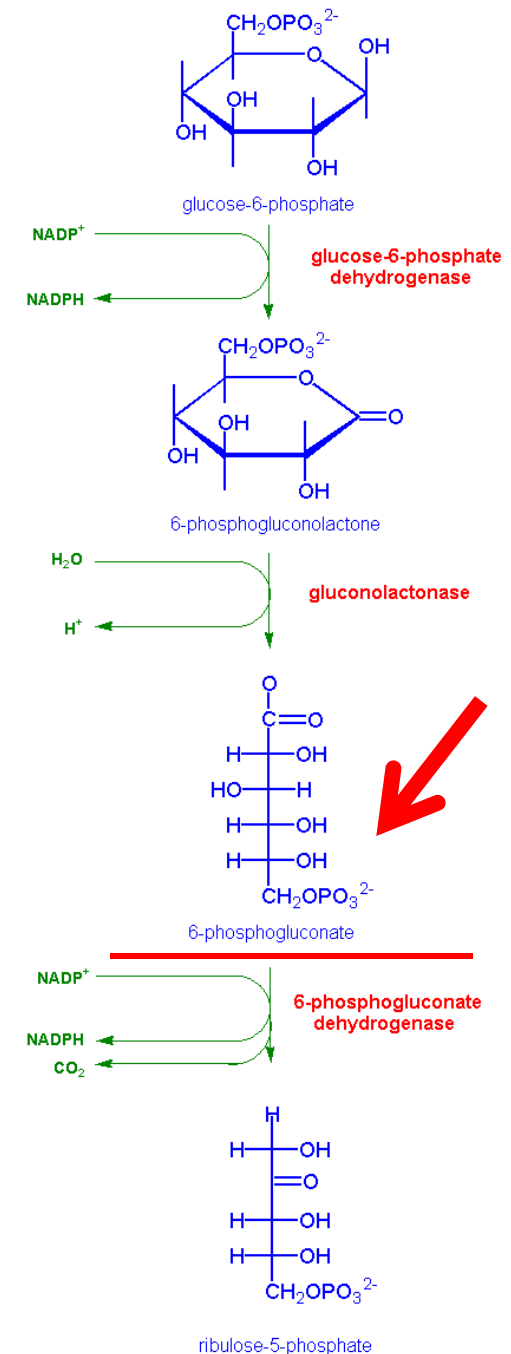
Graphic©E. Schmid/2003



2.1.1.2. Καταβολική οδός φωσφοροπεντοζών (PPP)

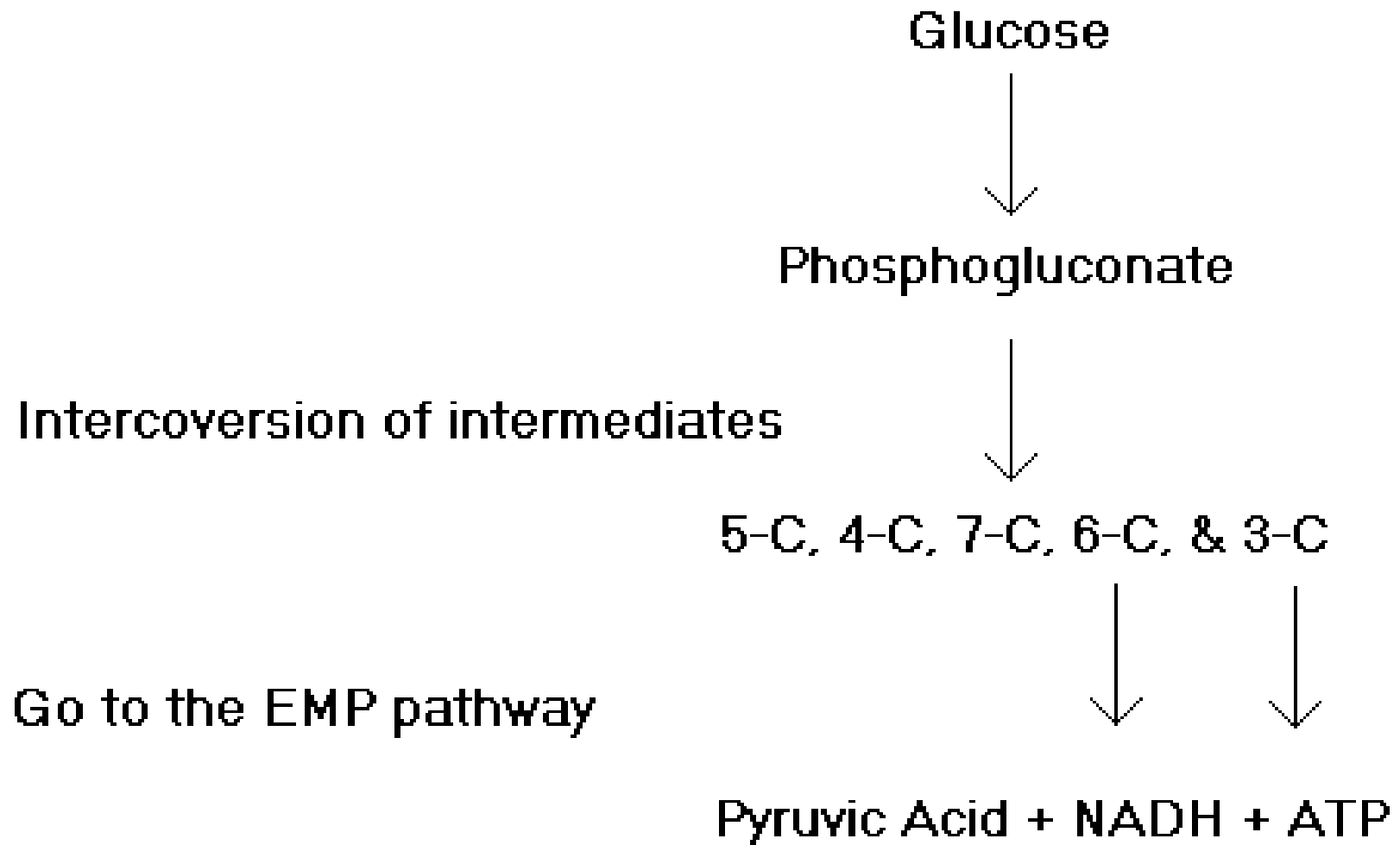
- Αποδομή 5-6 C
- Κυταροπλασματική
- Αναεροβική
- Τελικά προϊόντα
 - 1 ATP
 - 2 NADPH
 - CO_2
 - 4,5,6,7 C
 - αμινοξέα
 - νουκλεοτίδια
 - Γλυκολυτικοί δρόμοι
 - φωτοσύνθεση

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/>

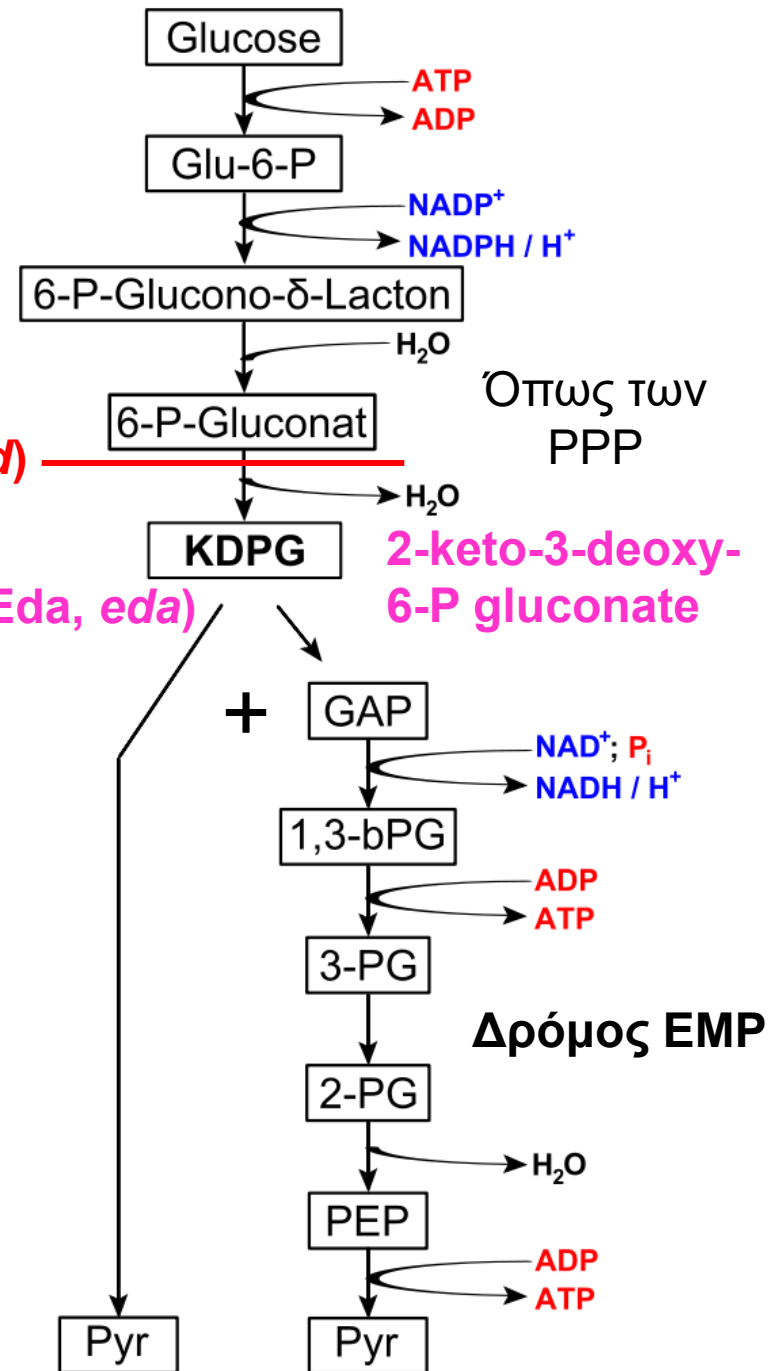
Phosphogluconate dehydratase (*edd*)

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

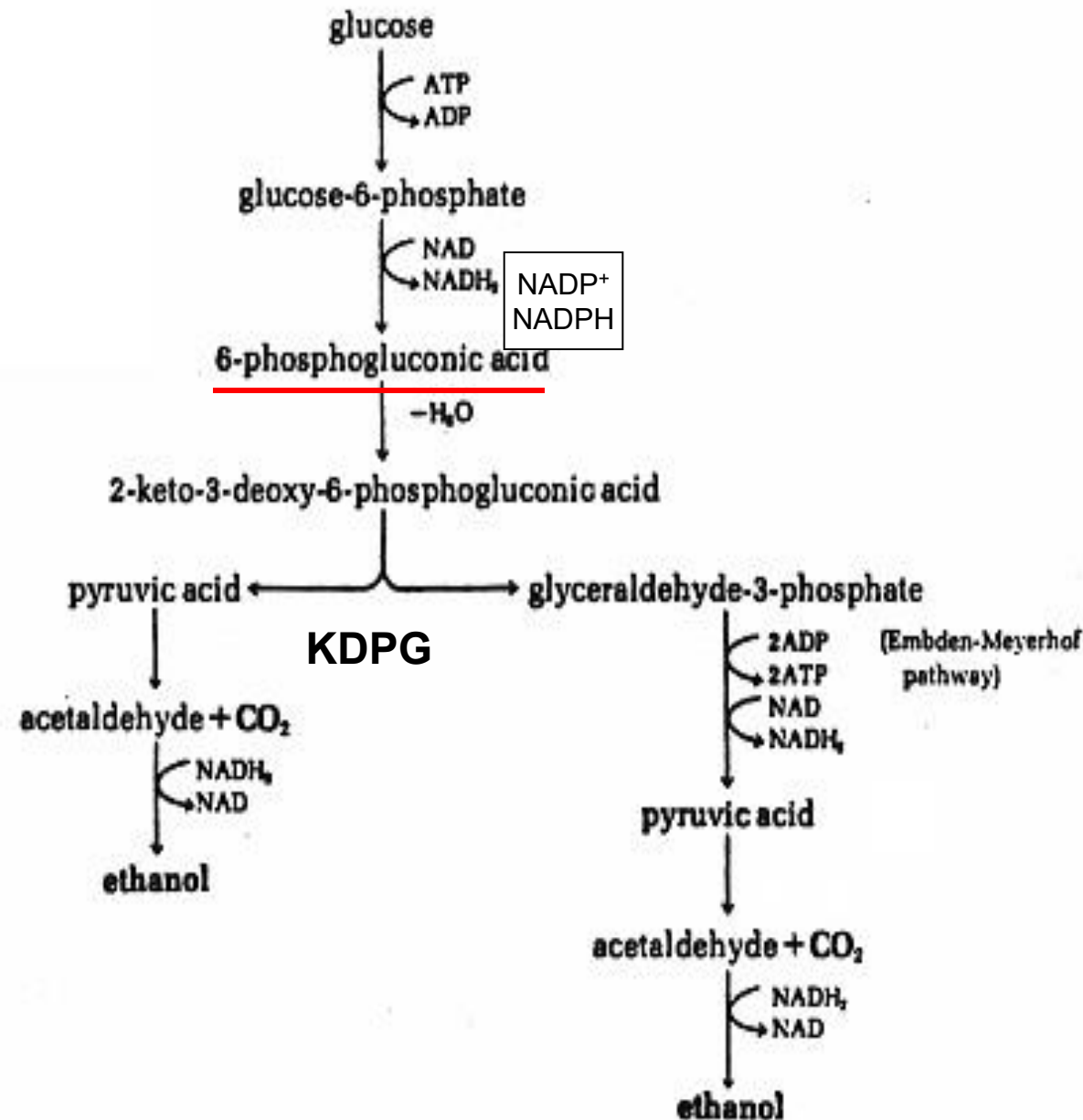
J Bacteriol. 2005 Feb;187(3):991-1000.

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.



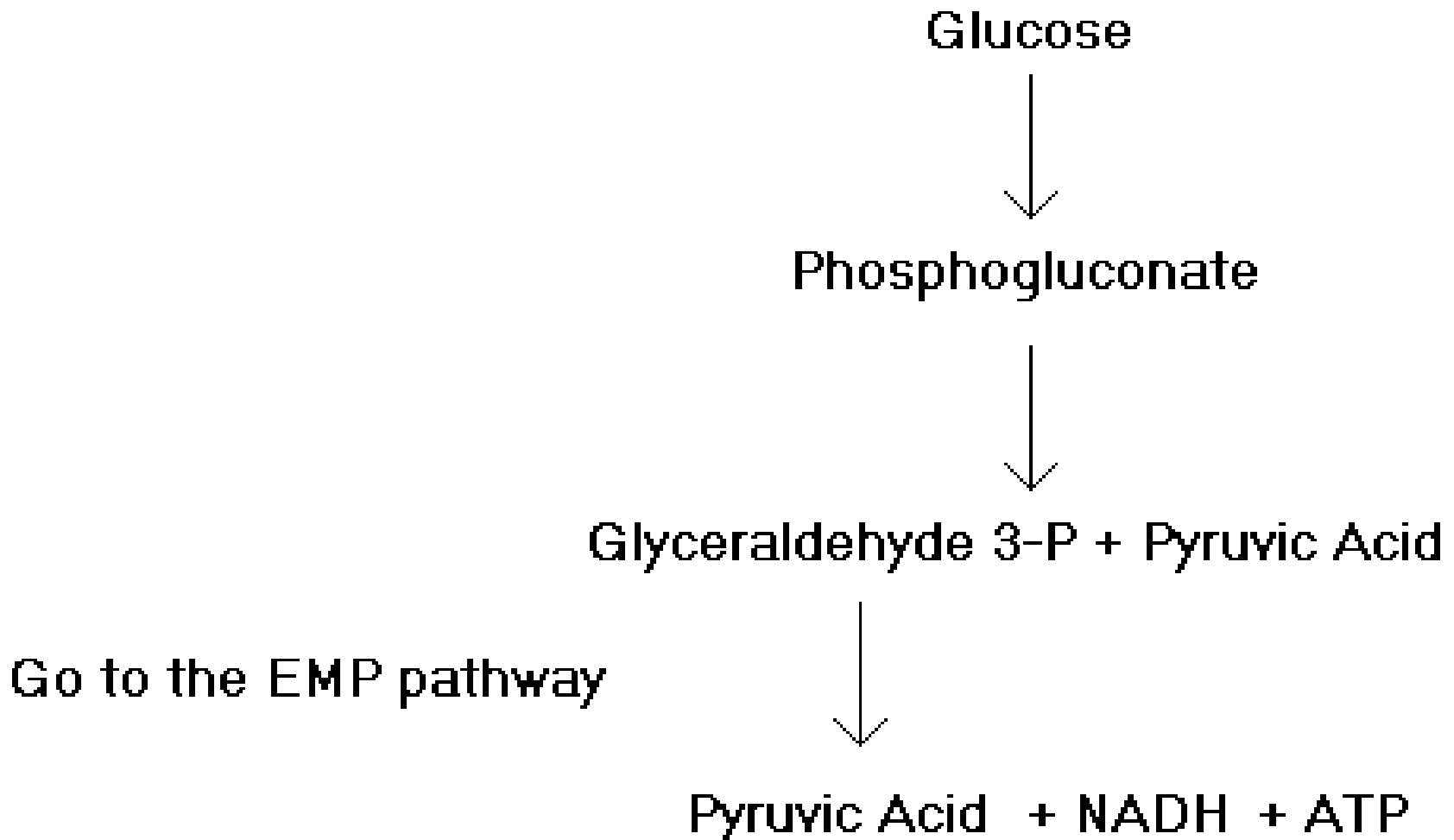
Καταβολική οδός Entner-Doudoroff (ED)



- Γλυκολυτική
- Κυτταρόπλασμα
- Δεν απαιτεί O
- Διαφορετικά ένζυμα
 - *Pseudomonas*
 - *Enterococcus*
- Τελικά προϊόντα
 - 2-1 = 1 ATP
 - NADPH
 - NADH
 - 2 πυροσταφυλικά
 - H₂O

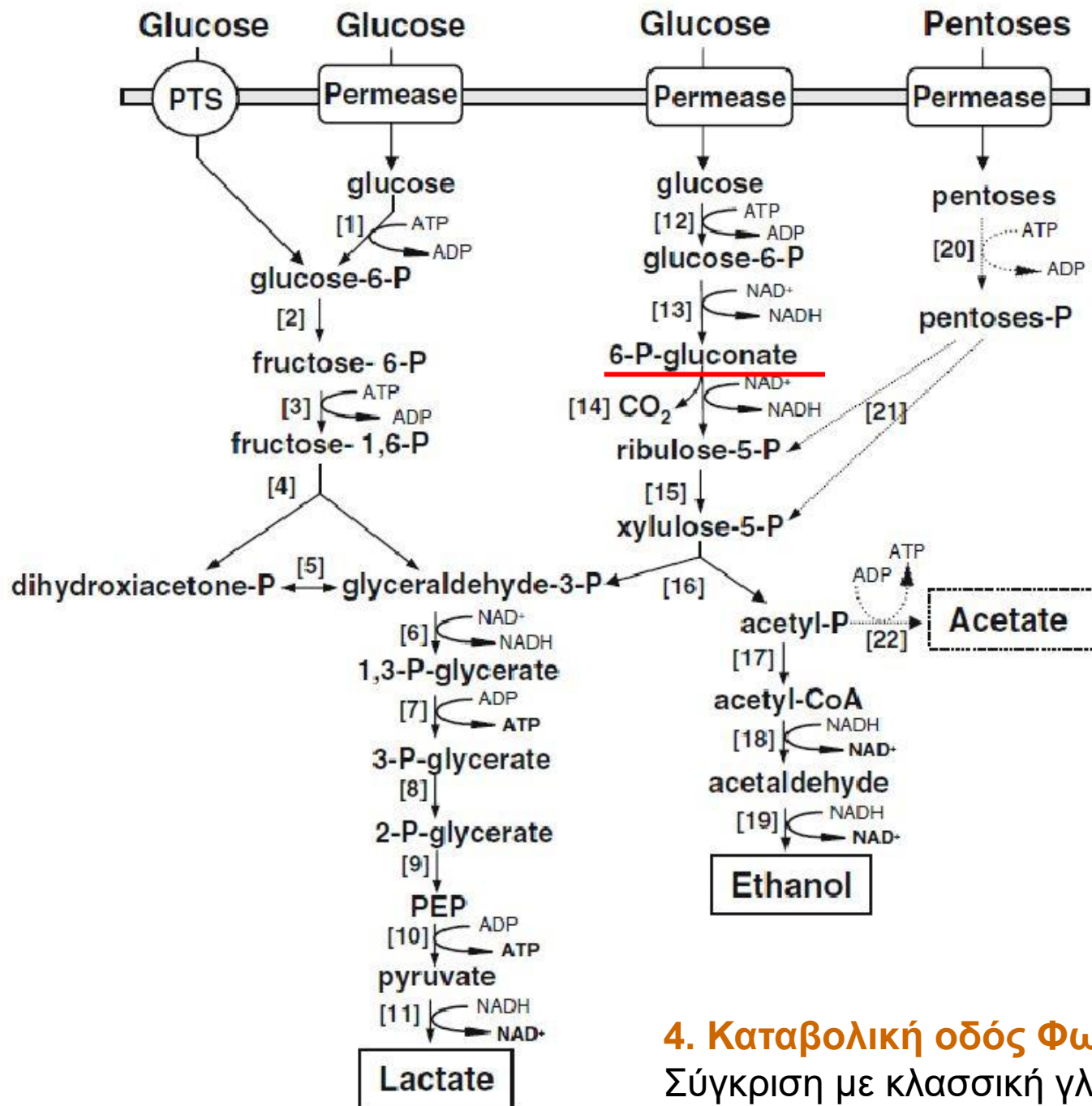
Καταβολική οδός Entner-Doudoroff (ED)

Σύνοψη:



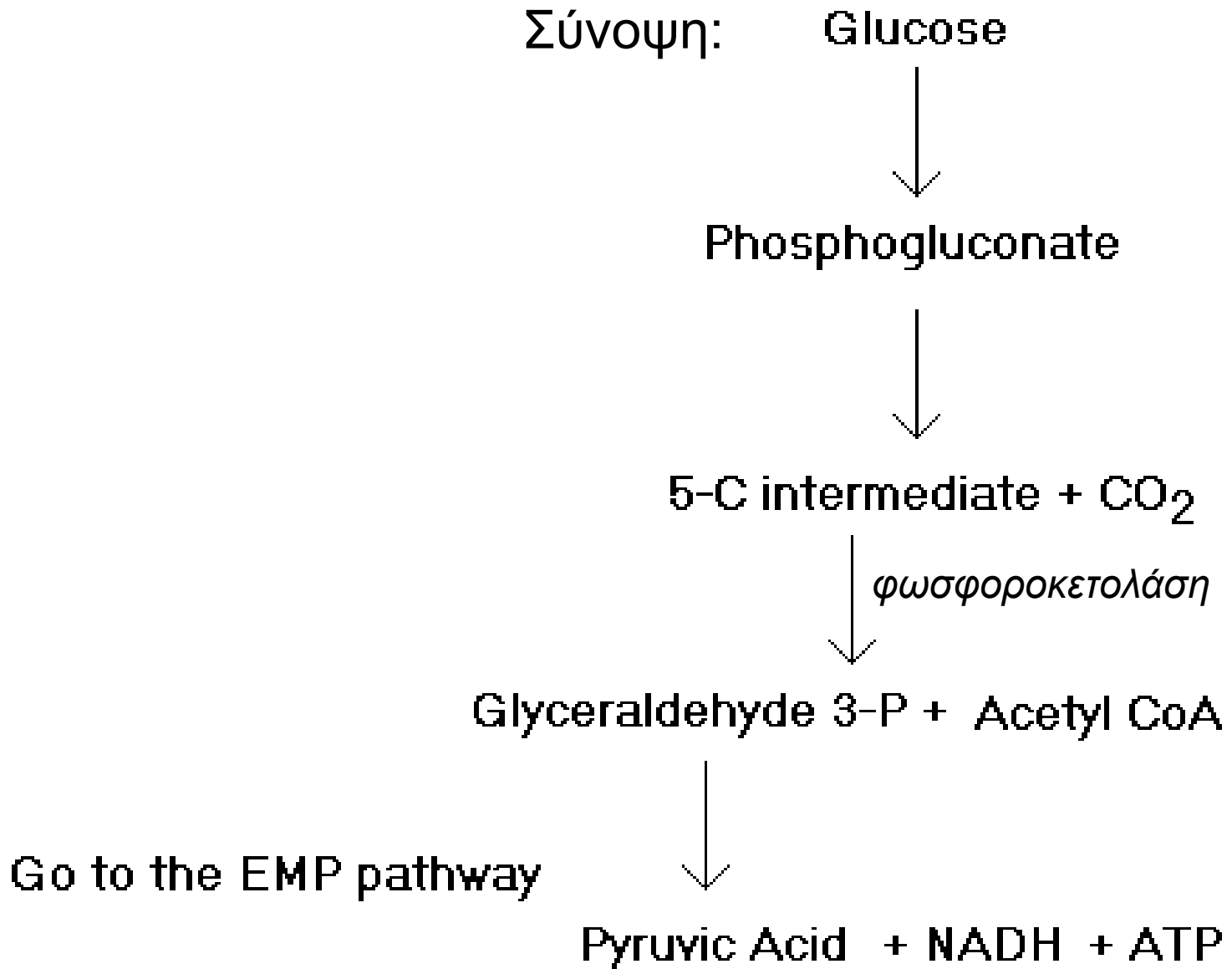
GLYCOLYSIS

PHOSPHOKETOLASE PATHWAY



4. Καταβολική οδός Φωσφοκετολάσης
Σύγκριση με κλασσική γλυκόλυση

2.1.1.4. Καταβολική οδός φωσφοροκετολάσης

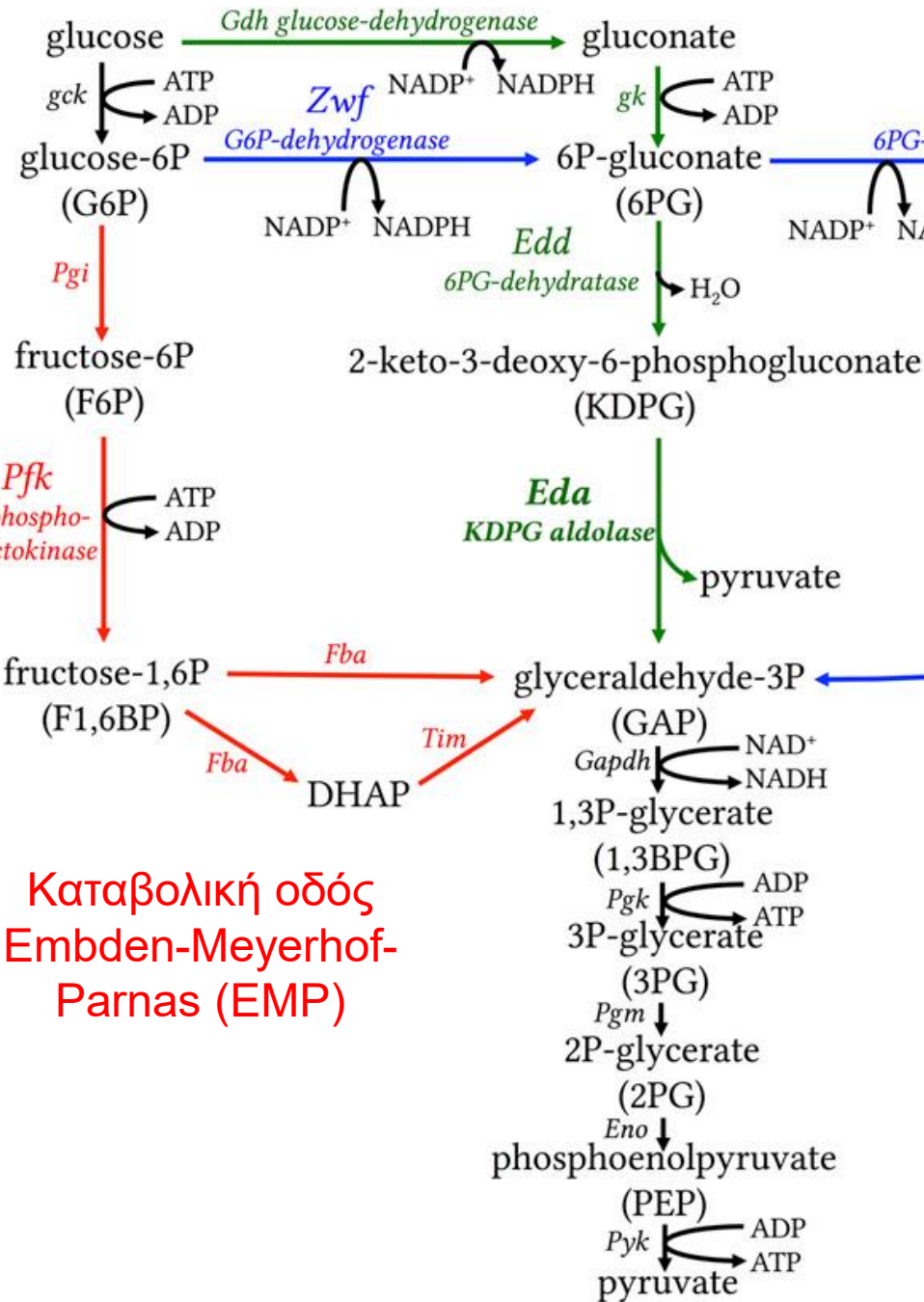


Σύγκριση γλυκολυτικών οδών

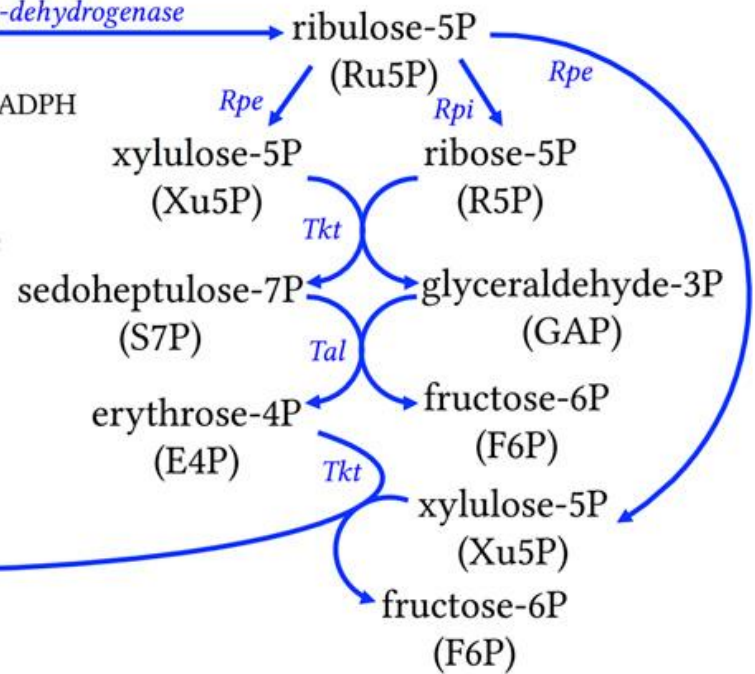
	“Κλασσική” γλυκόλυση EMP	PPP	Entner-Doudoroff
Προϊόντα	2 πυροσταφυλικά 2 ATP 2 NADH 2 H ⁺	πυροσταφυλικό κ φρουκτόζη 6 CO ₂ 12 NADPH 12 H ⁺	2 πυροσταφυλικά 1 ATP 1 NADPH 1 NADH 2 H ⁺

Σύνοψη γλυκολυτικών δρόμων

Καταβολική οδός Entner-Doudoroff (ED)



Καταβολική οδός φωσφοροπεντοζών (PPP)

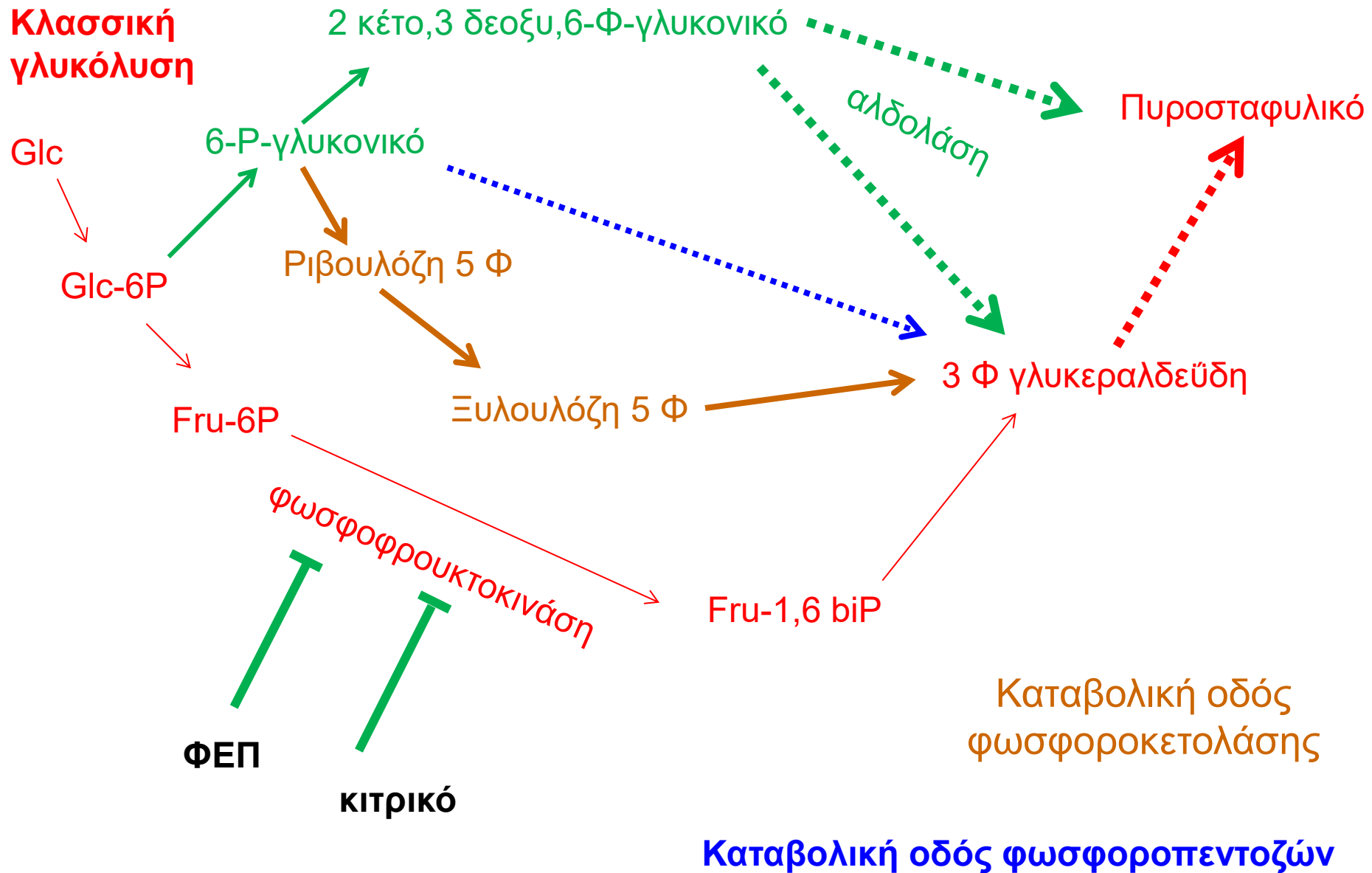


Λείπει η καταβολική οδός της φωσφοροκετολάσης

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

Καταβολική οδός Entner-Doudoroff

**Κλασσική
γλυκόλυση**



Γλυκολυτικοί οδοί για διαφορετικά είδη

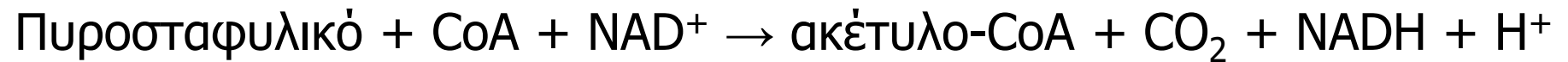
	EMP	PPP	ED
<i>Acetobacter aceti</i>	-	+	-
<i>Bacillus subtilis</i>	κύρια	ελλάσων	-
<i>E. coli</i>	+	-	-
<i>Lactobacillus acidophilus</i>	+	-	-
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	-	-	+
<i>Vibrio cholera</i>	ελλάσων	-	κύρια

Η οδός φωσφοκετολάσης

Βρίσκεται σε μια μεγάλη ποικιλία ειδών, ιδιαίτερα σε **ετεροζυμωτικά βακτήρια**, όπως τα γένη *Lactobacillus*, *Leuconostoc*, *Streptococcus* και *Lactococcus*.

Υπάρχει επίσης σε ορισμένα **κυανοβακτήρια** και σε ορισμένους άλλους οργανισμούς όπως τα **bifidobacteria** (ωφέλιμα συμβιωτικά βακτήρια) και σε **μύκητες** όπως ο *Rhizopus*.

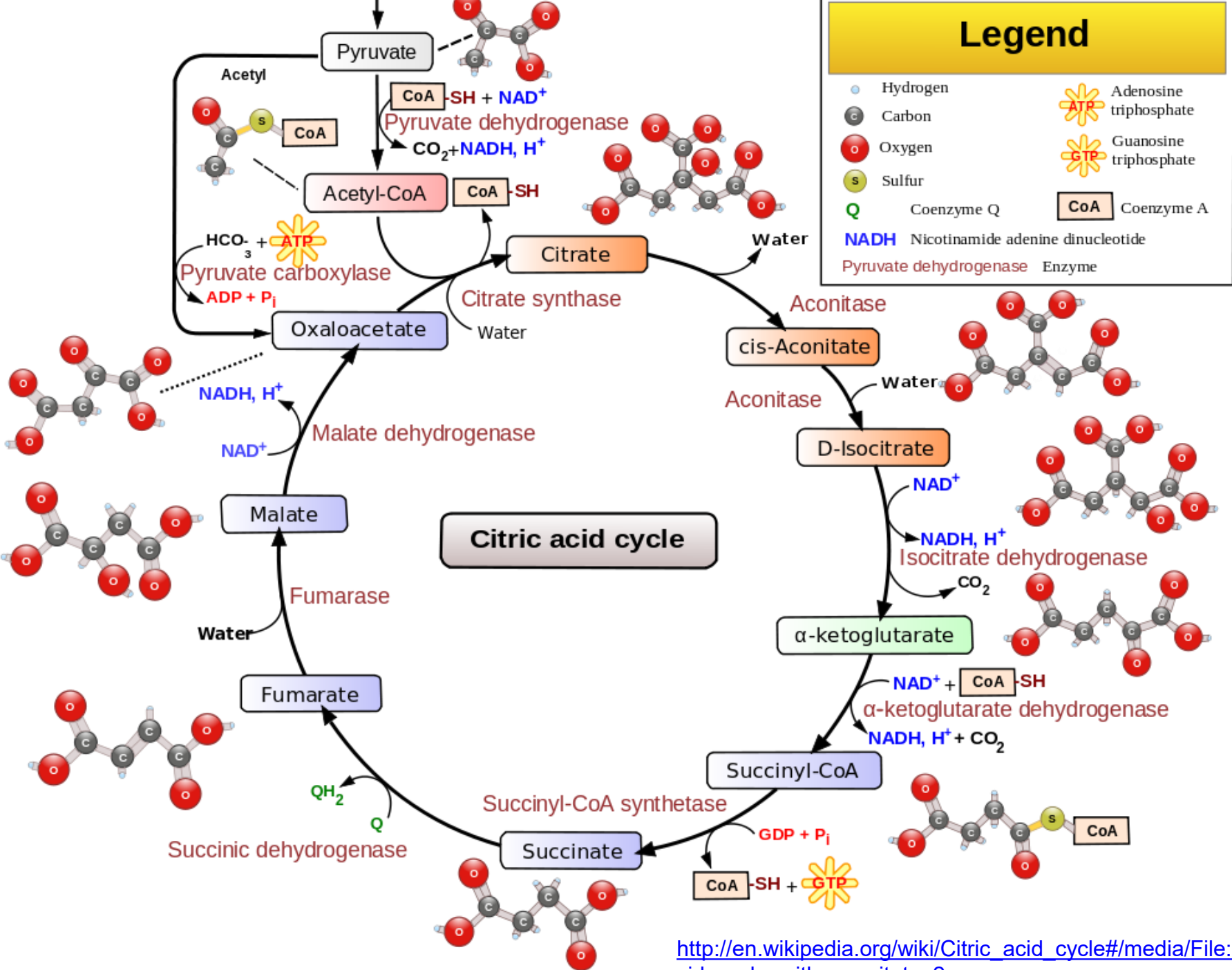
2.1.2. Μεταβατική αντίδραση



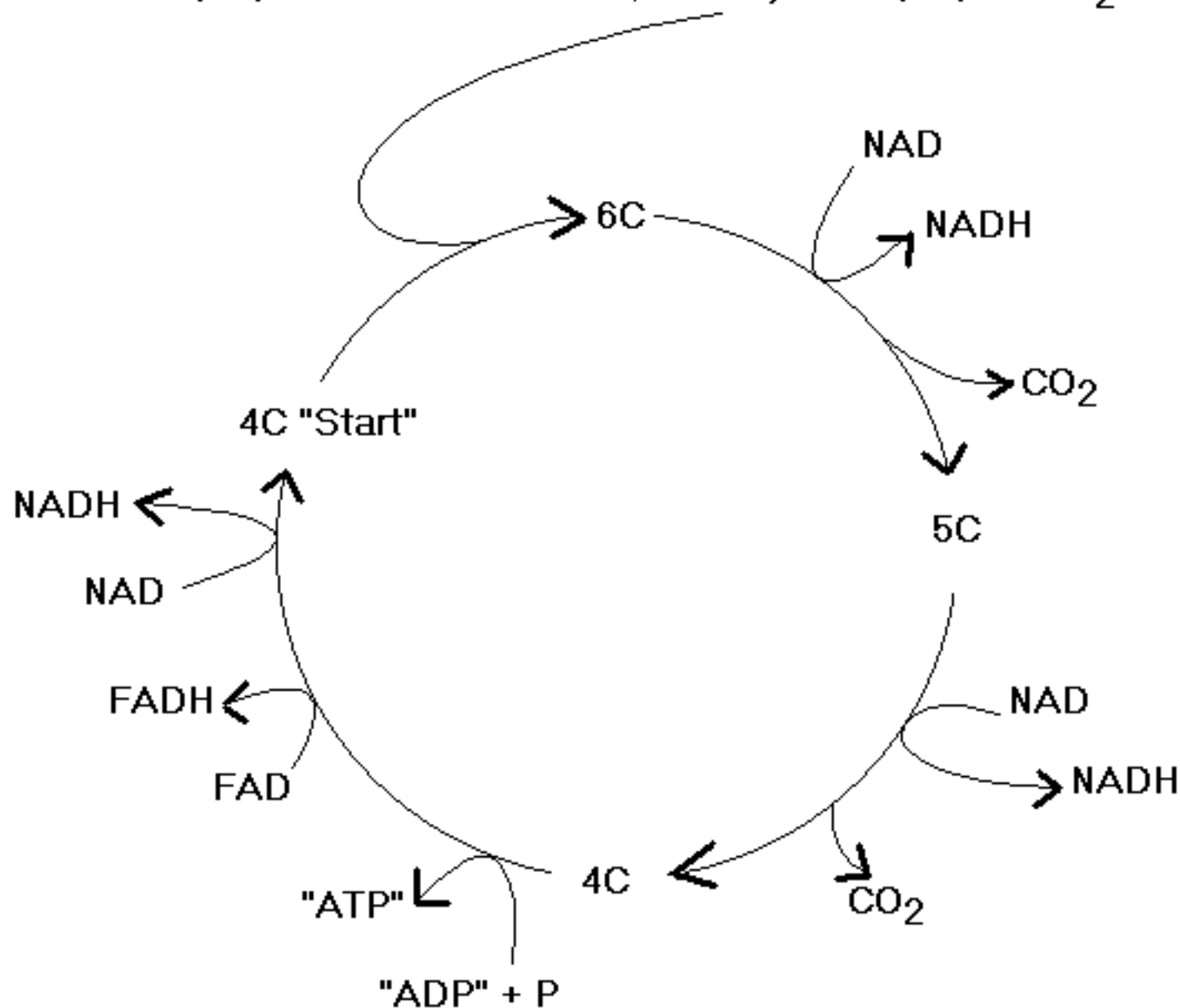
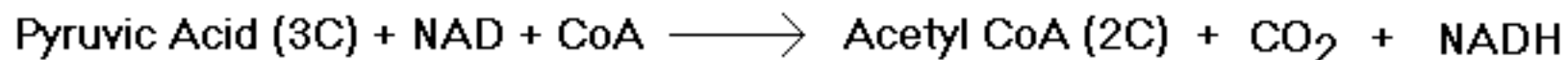
- Συνδέει τη γλυκόλυση με τον κύκλο του Krebs
- **Τελικά προϊόντα:**
 - 2 ακέτυλο-συνένζυμο A
 - 2 CO₂
 - 2 NADH + 2 H⁺

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⁺
 - 2 FADH + 2 H⁺
 - 4 CO₂



Respiration: Preliminary Reactions and the Krebs Cycle

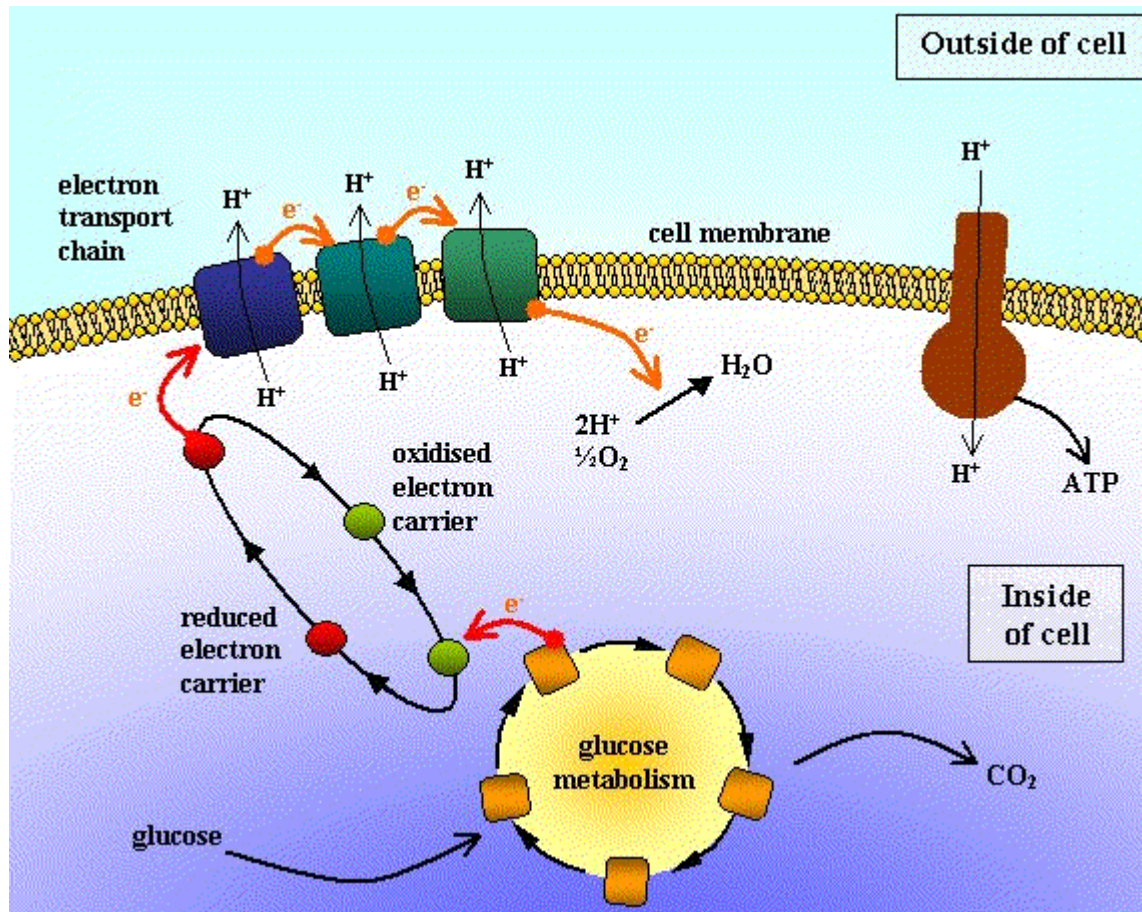
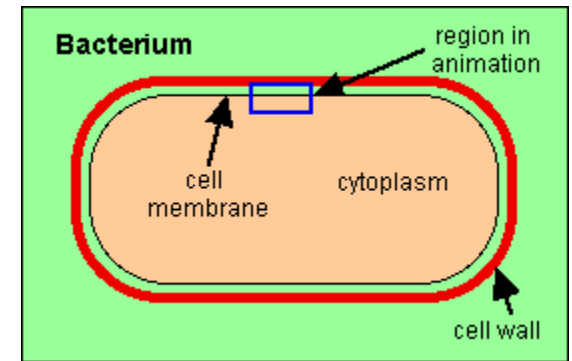


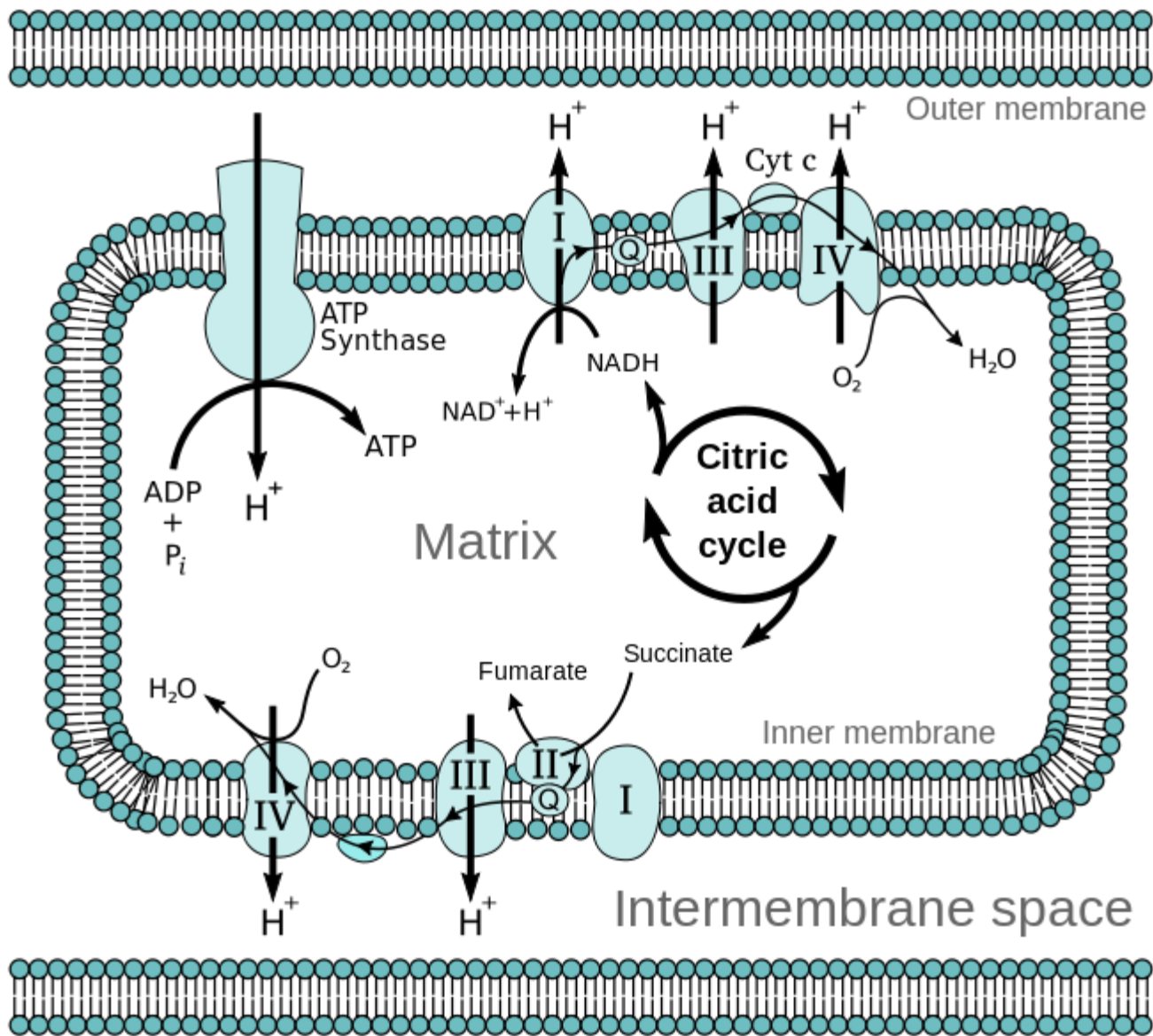
2.1.4. Αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων

- Συμβαίνει στα μιτοχόνδρια και την βακτηριακή μεμβράνη
- Μηχανισμός που τελικά δημιουργεί **χημειώσμωση**:
Η διαδικασία μετακίνησης ιόντων (π.χ. πρωτονίων) στην άλλη πλευρά μιας βιολογικής μεμβράνης και, ως αποτέλεσμα, παράγεται μια ηλεκτροχημική κλίση.
Αυτή η ηλεκτροχημική κλίση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνθεση ATP από AMP και φωσφορικά.

– **Τελικά προϊόντα:** 34 ATP

Δημιουργία χημειώσμωσης στα βακτήρια





Δημιουργία χημειώσματος 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⁺

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

FADH + H⁺

- 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

	ATP
• Γλυκόλυση	2
• Μεταβατική αντίδραση	0
• Κύκλος Krebs	2
• Αναπνευστική αλυσίδα	34
• Σύνολο	38

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

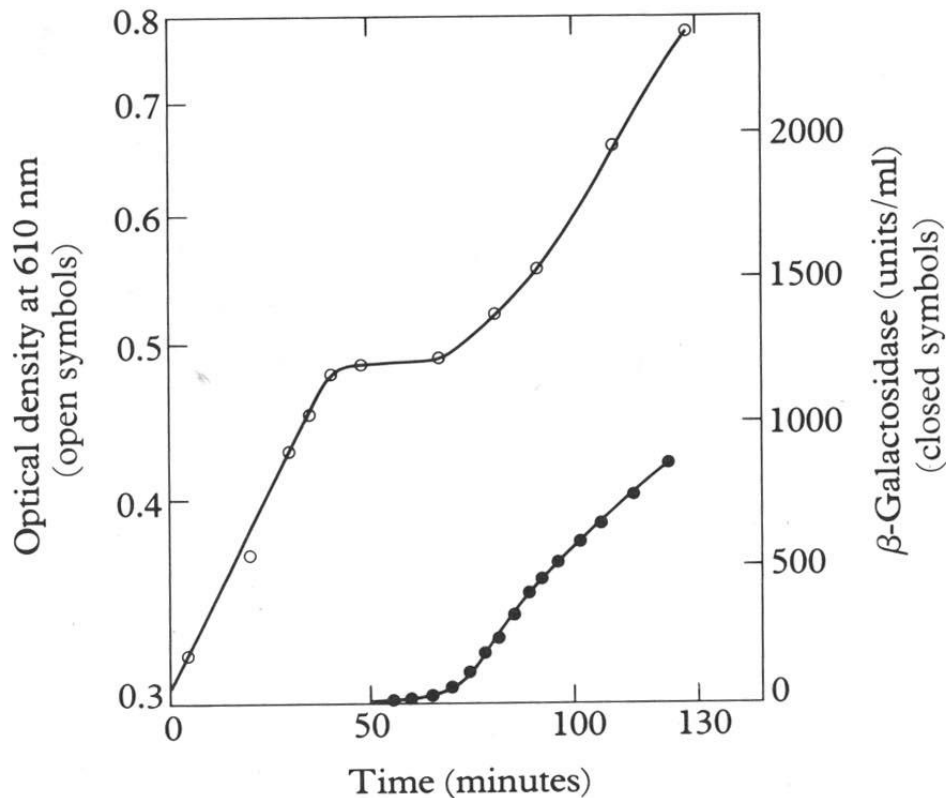
2.2.1. Καταστολή από τον καταβολίτη

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.

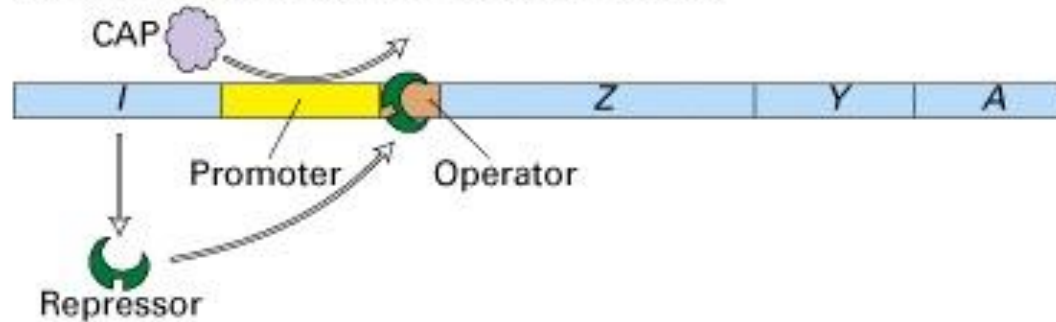
2.2.1. Καταστολή από τον καταβολίτη



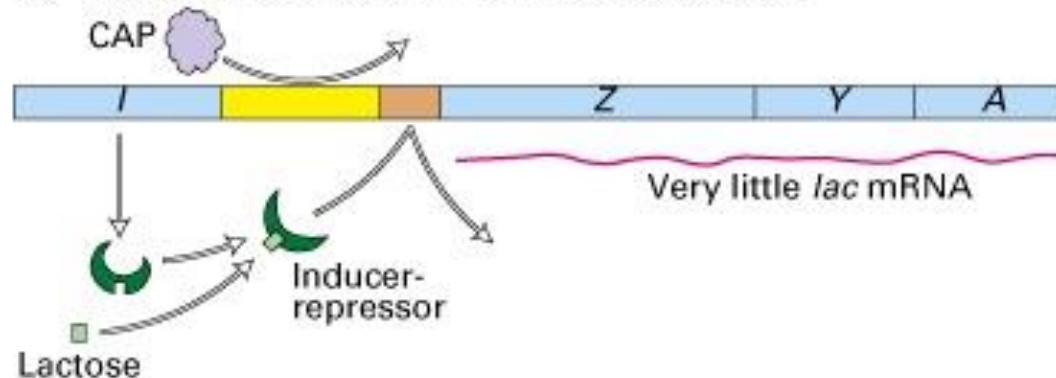
Delayed appearance of β -galactosidase in *E. coli* growing in a medium containing initially 0.4 mg/ml of glucose and 2 mg/ml of lactose. The left-hand ordinate indicates the cell density of the growing culture. [From W. Epstein, S. Naono, and F. Gros, *Biochem. Biophys. Res. Commun.* **24**, 588 (1966).]

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

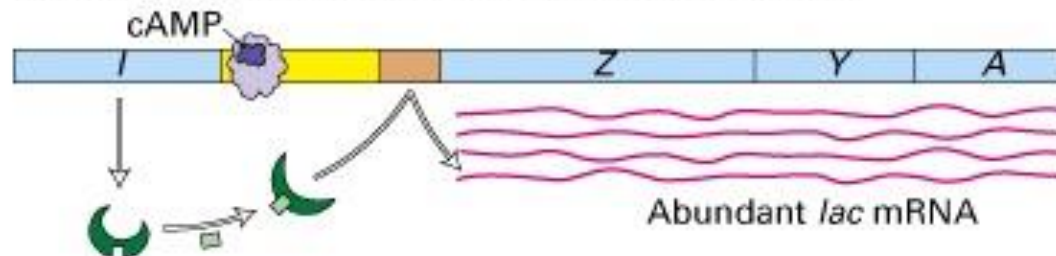
(a) Glucose present (cAMP low); no lactose



(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 β -1,4 γλυκανάσες → κελλοβιόζη

Κελλοβιόζη + β -γλυκοζιδάση → γλυκόζη

Μύκητες, συμβιωτικά βακτήρια μυρηκαστικών, λίγα θετικά κατά Gram αναερόβια

Sporocytophaga και *Cytophaga* (κυτταρινόσωμα).

Άμυλο: α -αμυλάση → α -γλυκόζη + α -μαλτόζη

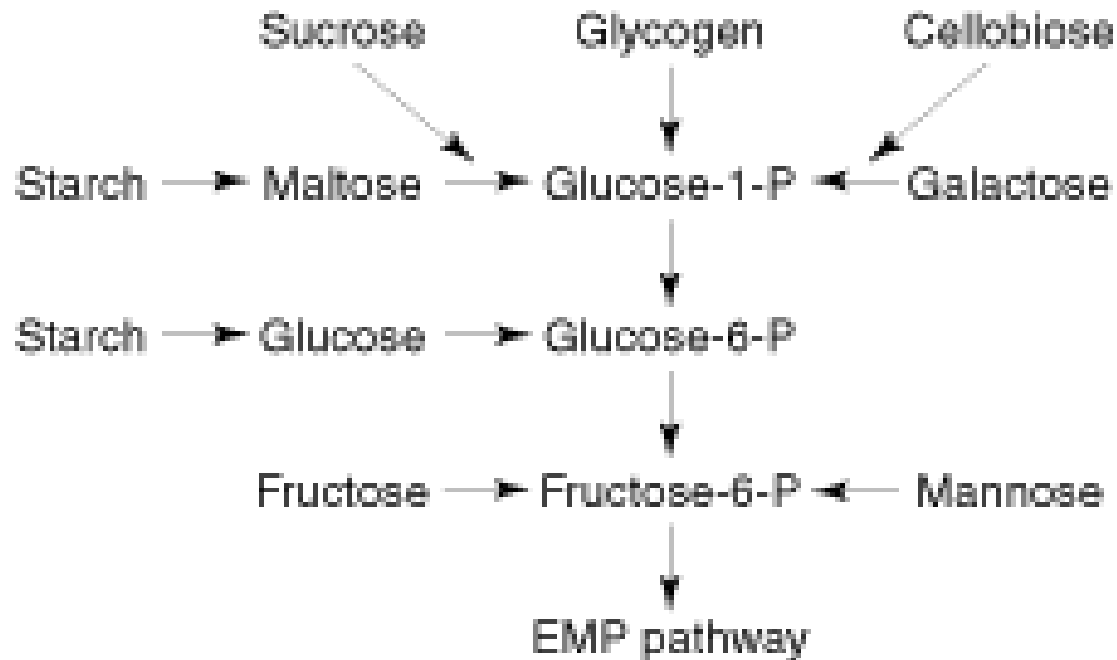
β -αμυλάση → β -μαλτόζη

Αμυλοπηκτίνη, γλυκογόνο → γλυκόζη, μαλτόζη, δεξτρίνη (α -1,6-γλυκοζιδάση).

Πουλλουλάνη (μαλτοτριόζες με α -1,6): πουλλουλανάσες (γλυκοαμυλάσες → γλυκόζη, τύπου I → μαλτοτριόζη, ισο-πουλλουλανάσες, α -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

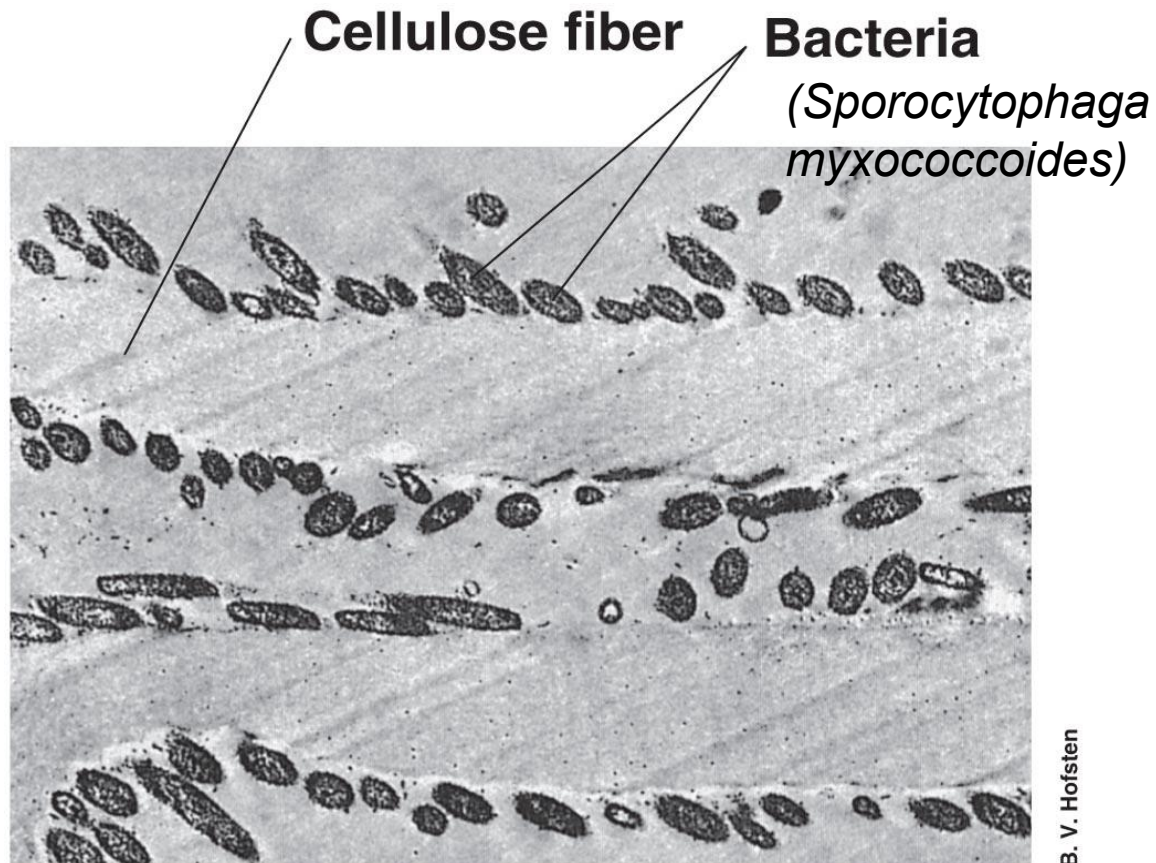


Πορφυρό μαύρο
χρώμα από το
σύμπλεγμα αμύλου-
ιωδίου

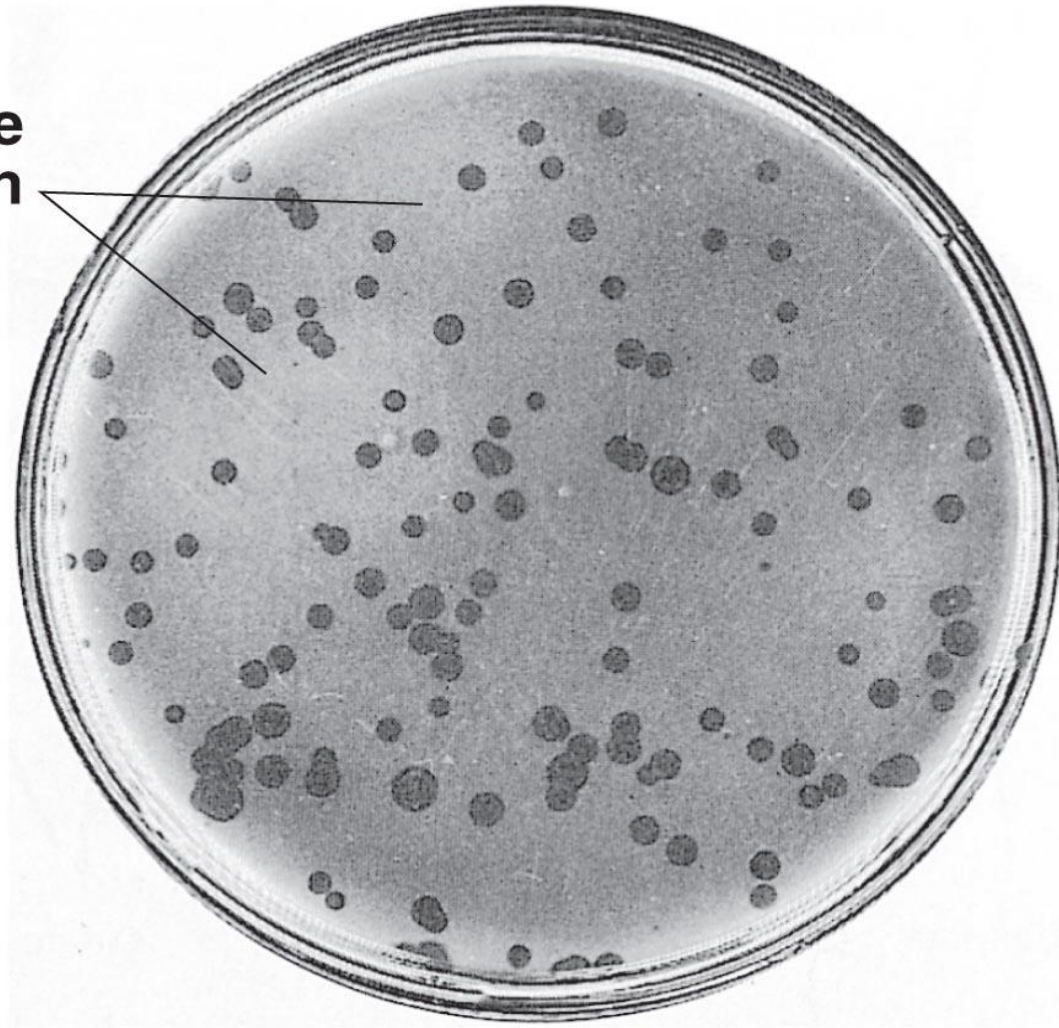
T. D. Brock

Παραδείγματα

Αποδόμηση κυτταρίνης



**Cellulose
digestion**



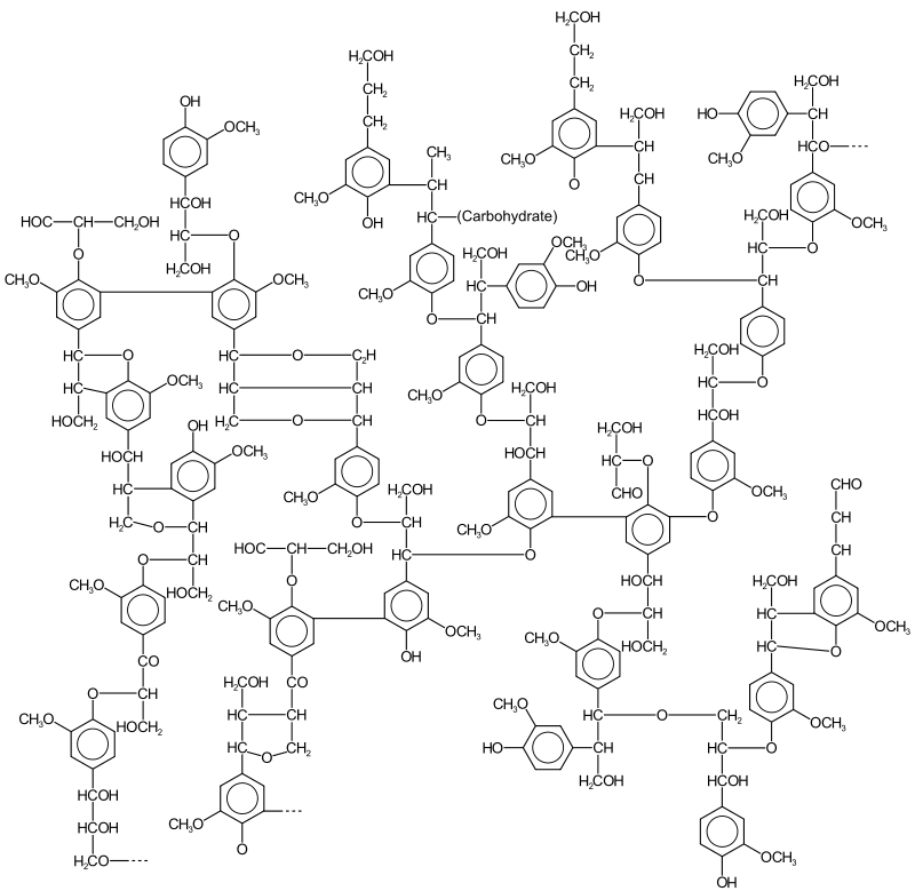
Katherine M. Brock

Παραδείγματα

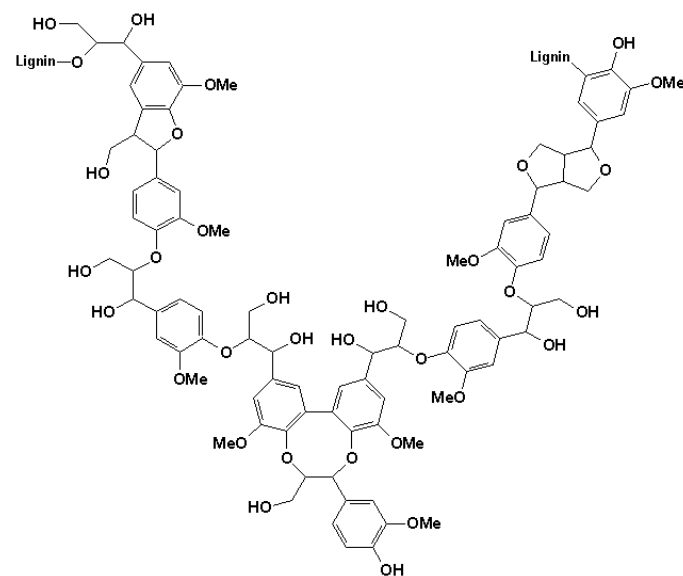
Αποικίες *Cytophaga hutchinsonii* σε τρυβλίο αгарόζης-κυτταρίνης

2.2.3. Άλλοι καταβολισμοί

Αρωματικά συστατικά (πχ λιγνίνη): εξειδικευμένοι μικροοργανισμοί και μύκητες



Τμήμα πολυμερούς λιγνίνης



By real name: Karol Głębpl.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. Ο κύκλος του γλυοξυλικού οξέως είναι μια μεταβολική οδός σε φυτά, βακτήρια και μύκητες που αποτελεί παραλλαγή του κύκλου του τρικαρβοξυλικού οξέος (TCA).

Επιτρέπει στους οργανισμούς να αναπτύσσονται όταν απουσιάζουν γλυκόζη/φρουκτόζη, χρησιμοποιώντας ενώσεις δύο ατόμων άνθρακα όπως το οξικό άλας, παρακάμπτοντας τα στάδια παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα του κύκλου του TCA.

Η κύρια λειτουργία του είναι η μετατροπή των μονάδων δύο ατόμων άνθρακα από πηγές όπως τα λιπαρά οξέα (π.χ. οξικό οξύ) για την τελική κατασκευή δύο δικαρβοξυλικών οξέων με αλυσίδα 4 ατόμων άνθρακα.

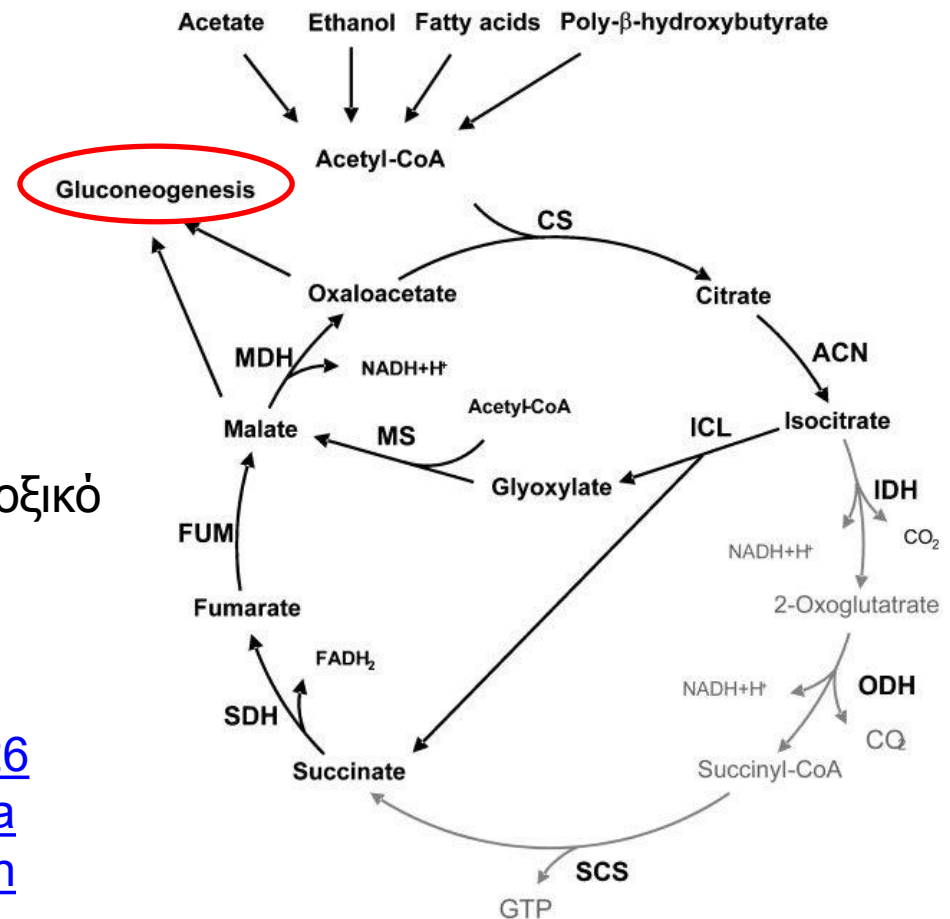
Αυτές μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για τη σύνθεση υδατανθράκων και άλλων απαραίτητων μορίων βιομάζας.

Κύκλος του γλυοξυλικού: Χρησιμοποιείται το οξικό οξύ για την τελική 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 C₂: $C_2H_5OH \rightarrow CH_3CHO \rightarrow$ ακέτυλο-CoA

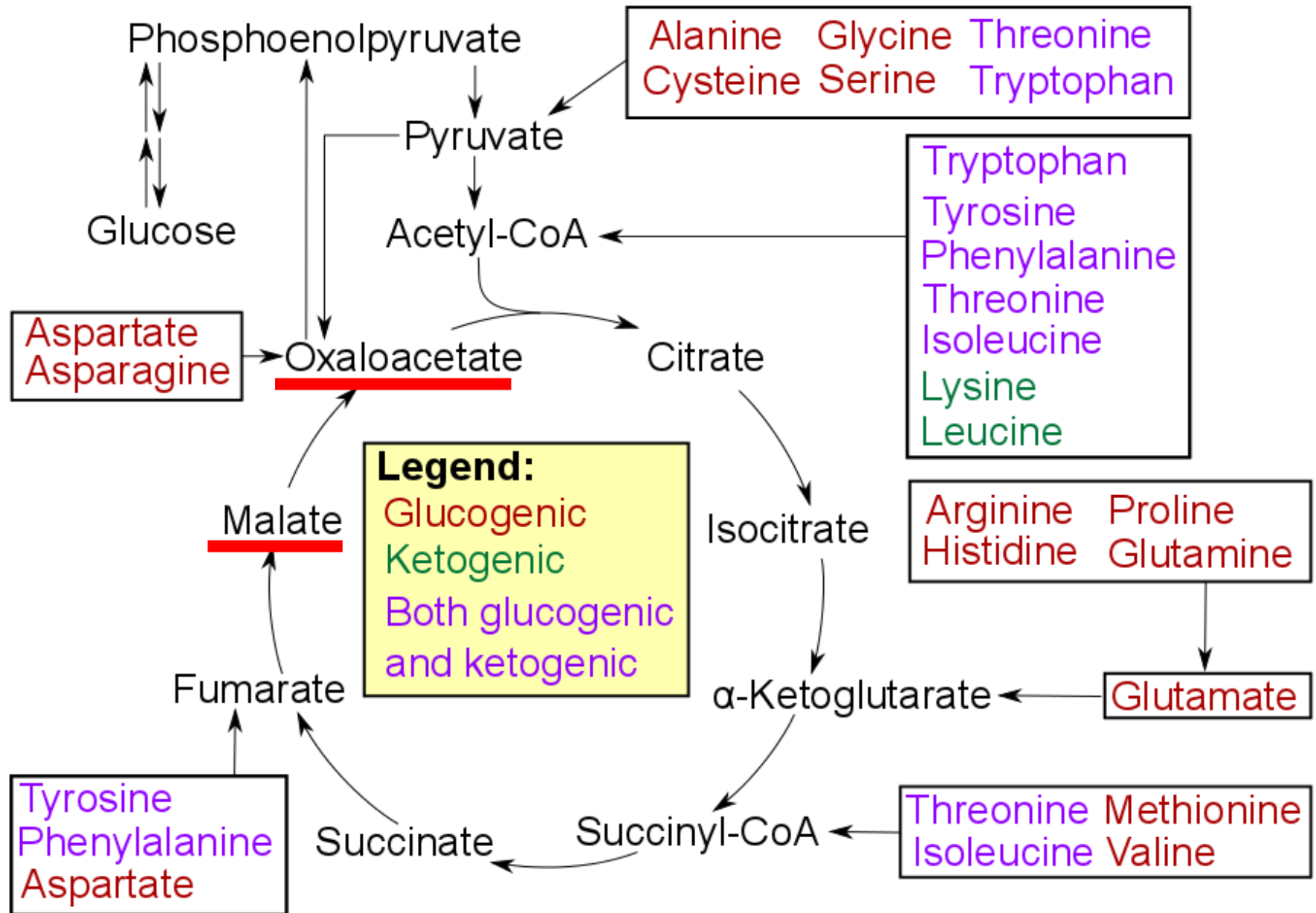
Υποβοηθάται η **σύνθεση κιτρικού** από υποστρώματα 2C, αλλά και η **παραγωγή γλυκόζης** από το μηλικό

ακέτυλο-CoA + γλυοξυλικό $\rightarrow$ μηλικό, οξαλοξικό

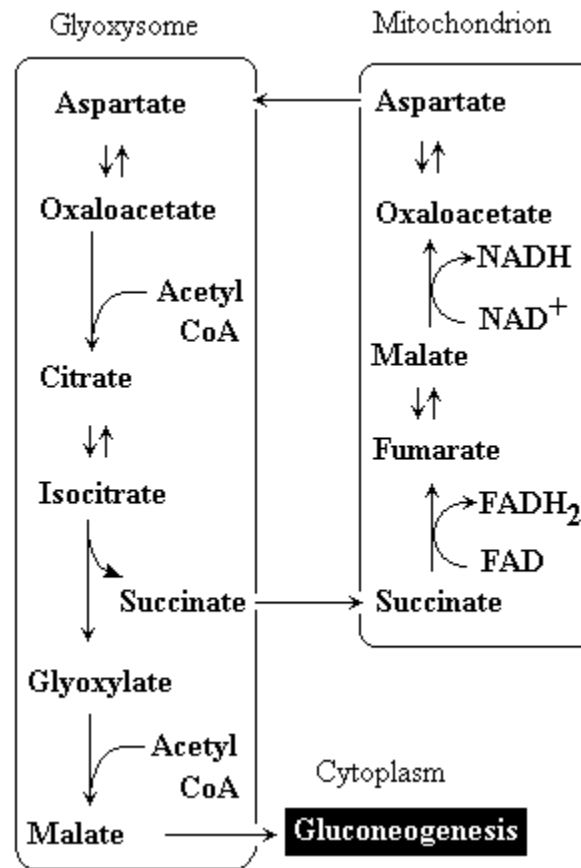


https://www.researchgate.net/publication/26745256_Major_roles_of_isocitrate_lyase_and_malate_synthase_in_bacterial_and_fungal_pathogenesis/figures?lo=1

Γλυκονεογένεση από αμινοξέα. Διακρίνεται ο ρόλος του **μηλικού** και **οξαλοξικού**.



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 CH₄ και CH₃OH

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 CH₄

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

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

$\text{CH}_4 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$ μεθανότροφα βακτήρια,
μονοοξυγονάση του CH₄, NAD(P)H

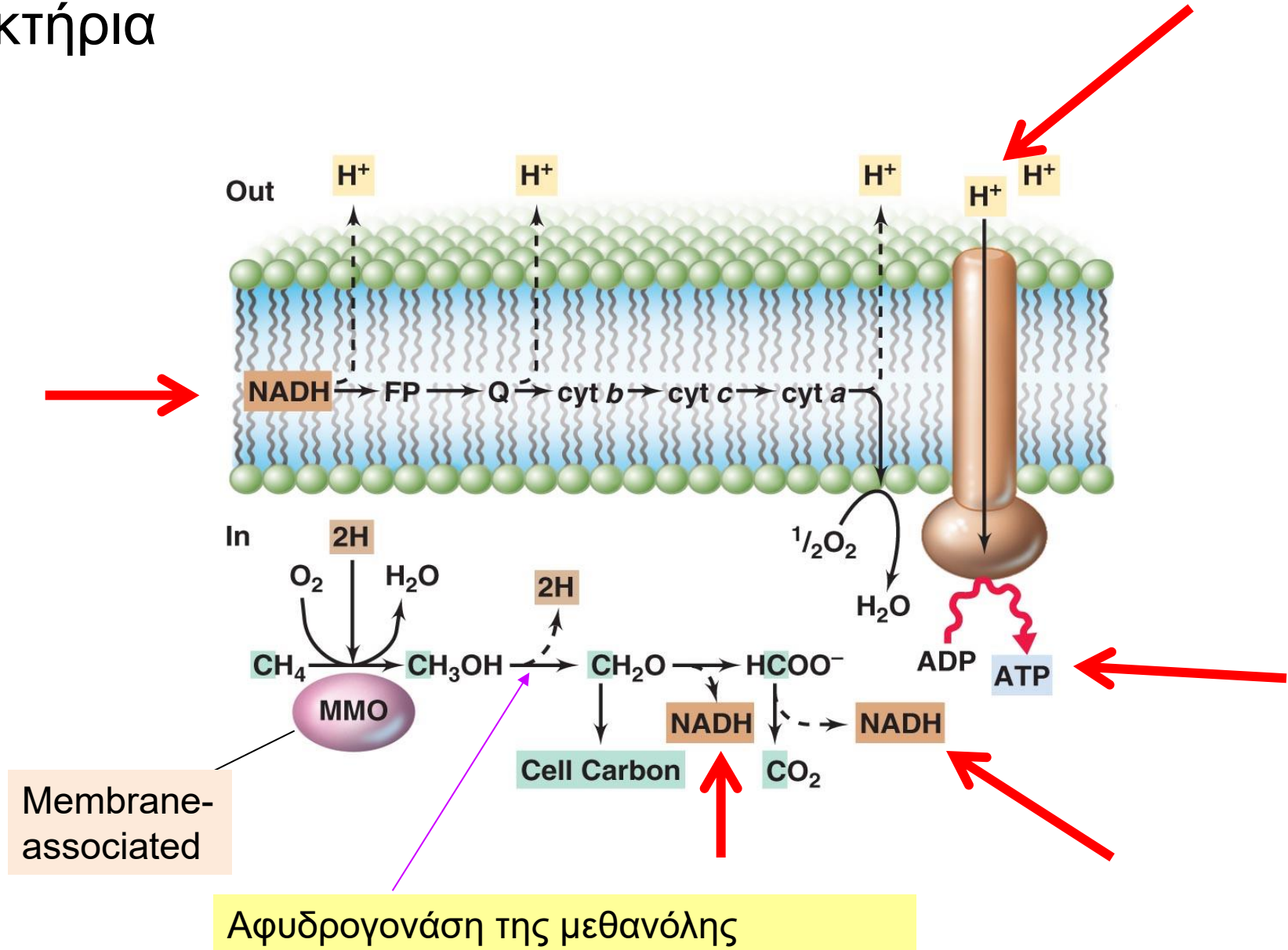
$\text{CH}_3\text{OH} + \text{NAD}^+ \rightarrow \text{HCHO} + \text{NADH} + \text{H}^+$ βακτήρια (+ATP) και ζύμες (-ATP)

$\text{HCHO} + \text{NAD}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCOOH} + \text{NADH} + \text{H}^+$

$\text{HCOOH} + \text{NAD}^+ \rightarrow \text{CO}_2 + \text{NADH} + \text{H}^+$ βακτήρια και ζύμες

Το NADH δίνει ηλεκτρόνια στην αναπνευστική αλυσίδα.

Οξείδωση του CH_4 σε CO_2 από τα μεθανοτροπικά βακτήρια

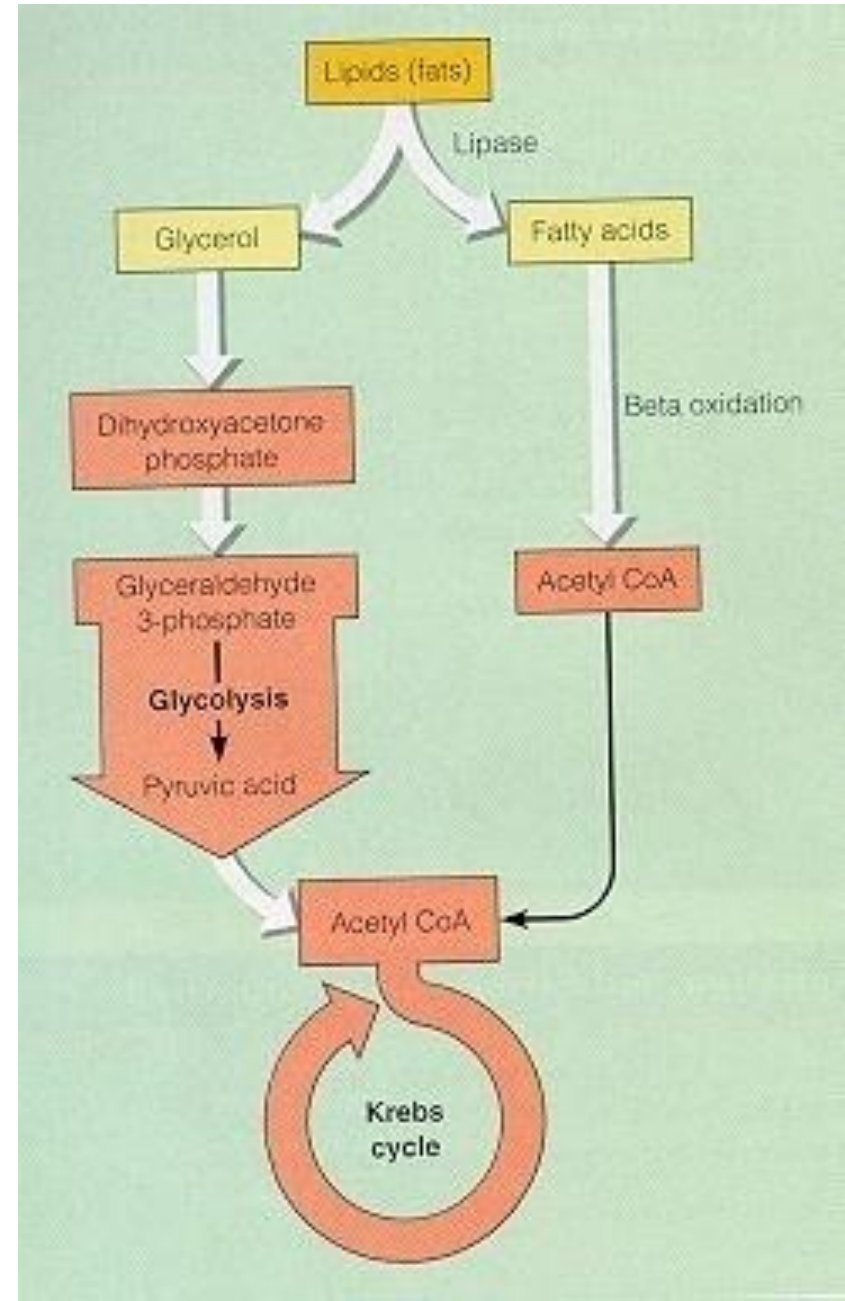


ΤΕΛΟΣ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ

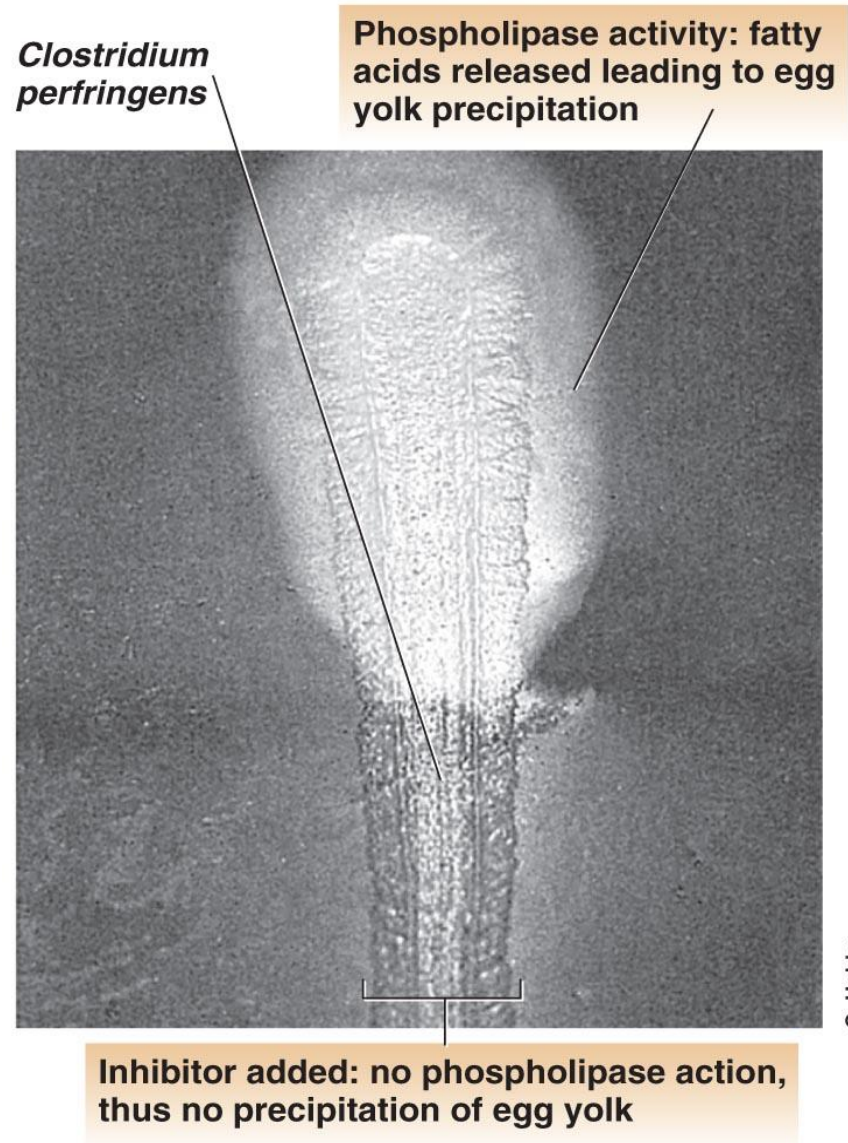
2.3 Καταβολισμός λιπαρών οξέων

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.

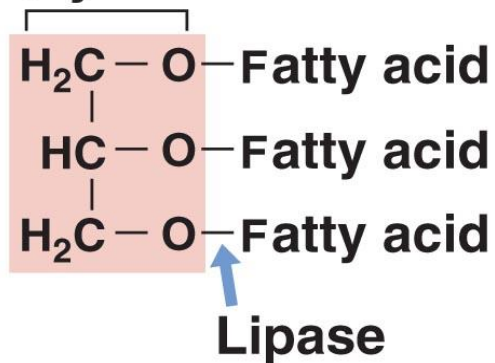


Ενεργότητα φωσφολιπάσης από κλωστρίδια σε κρόκκο αυγού

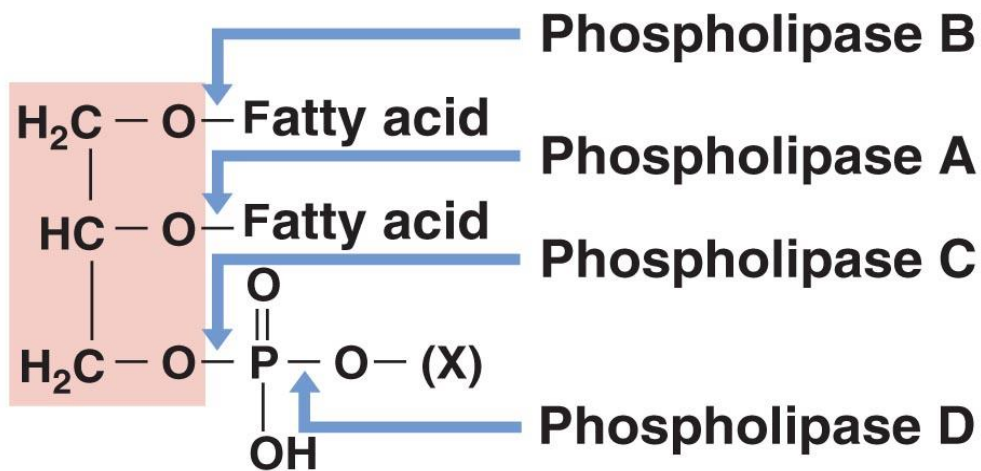


Λιπάσες

Glycerol



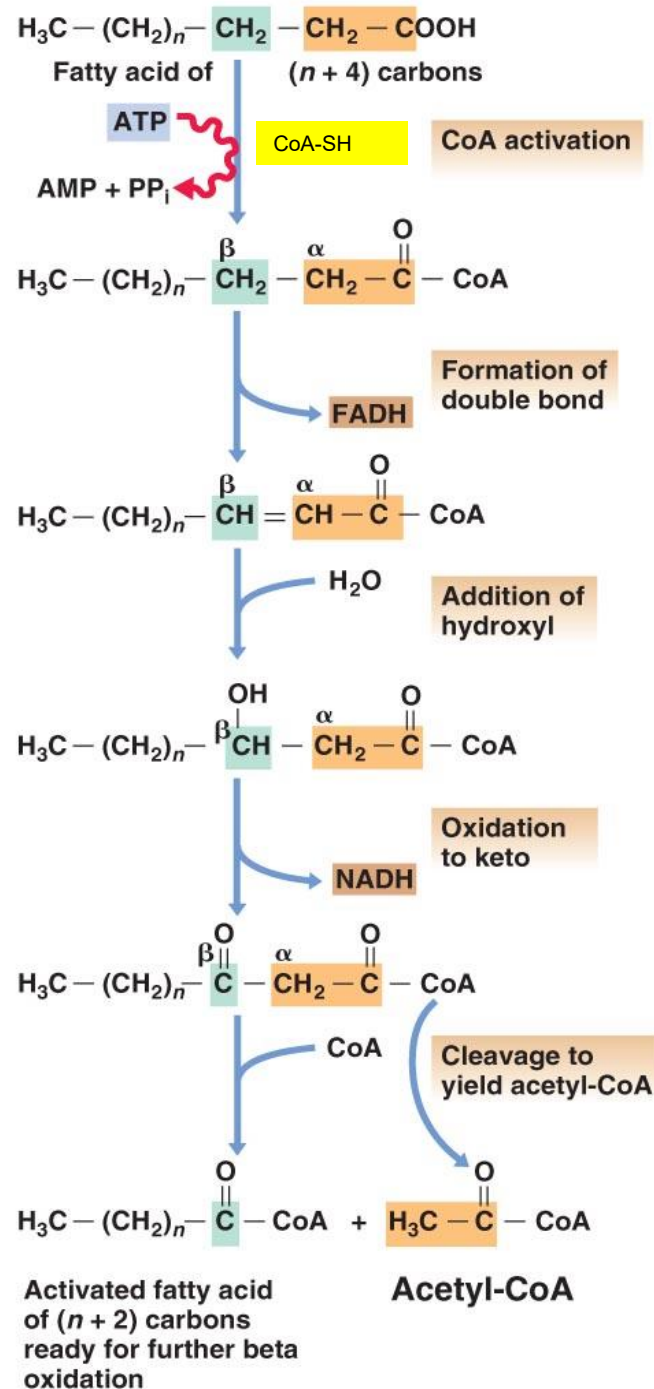
(a)



(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



Στον κύκλο του κιτρικού:
 Θεωρητικά 17 ATP. Στην πράξη
 14 ανά κύκλο.

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

Στον κύκλο του κιτρικού

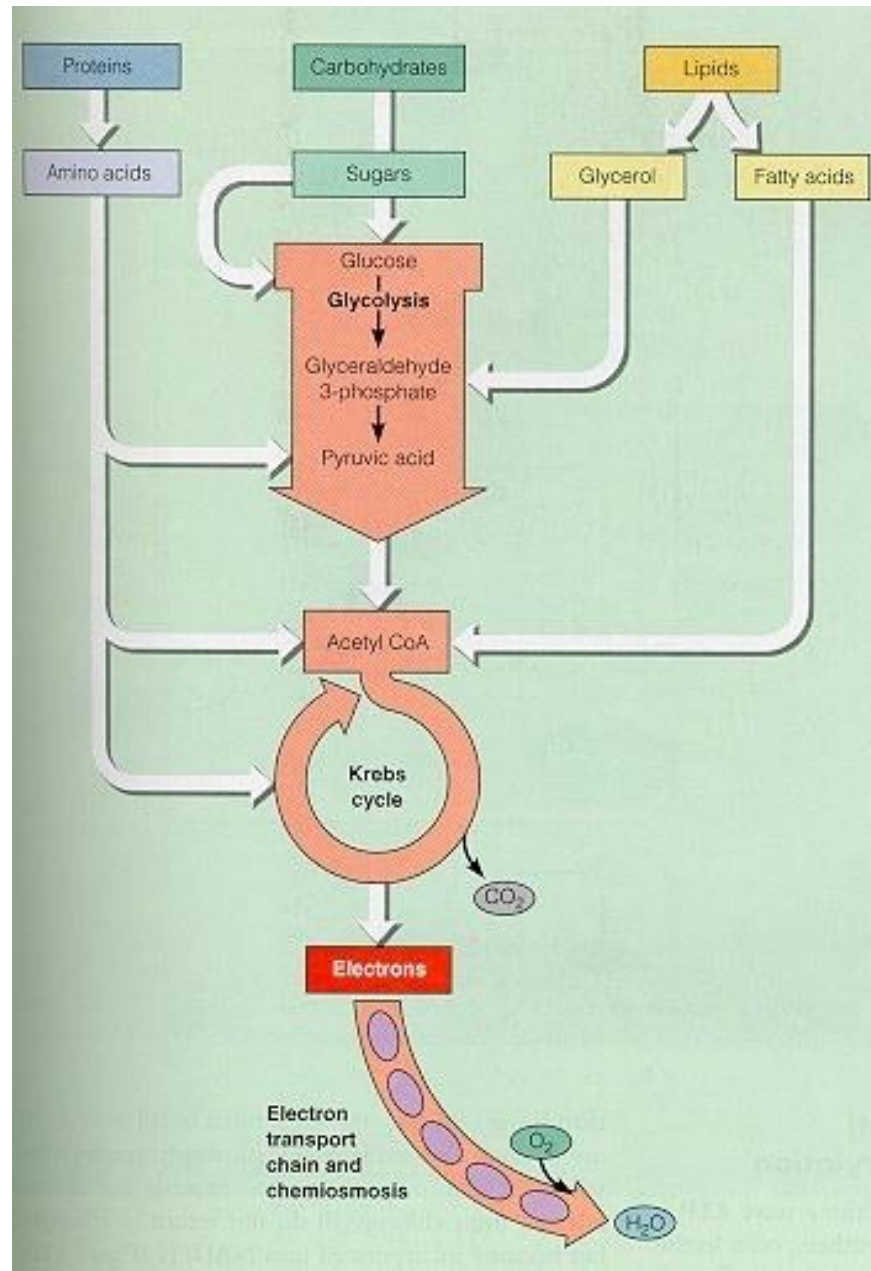
1 FADH ₂ παράγει	2 ATP	στην πράξη 1,5
1 NADH παράγει	3 ATP	στην πράξη 2,5
1 Ακέτυλο συνένζυμο Α παράγει	12 ATP	στην πράξη 10
Σύνολο	17	14

Για ένα κορεσμένο λιπαρό οξύ με άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα C_{2n}

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

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**. Μεγάλη απόδοση ενέργειας.

- Ζύμωση

- Ο δότης και αποδέκτης ηλεκτρονίων είναι η **ίδια ένωση** ($\text{NADH} \rightleftharpoons \text{NAD}^+$). Σχετικά μικρή απόδοση ενέργειας.

Ζυμώσεις (κυρίως από γλυκόζη)

Ορισμός:

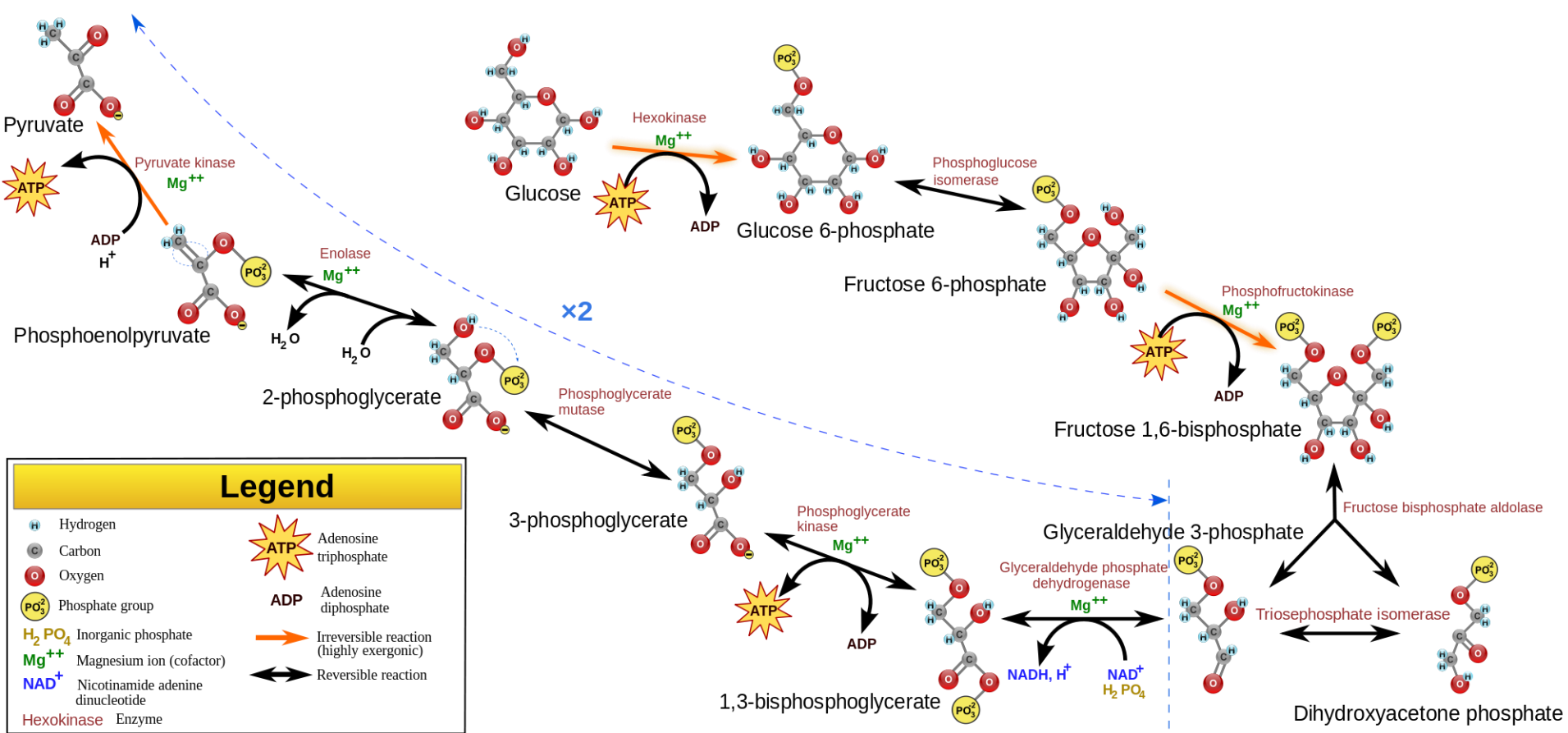
Ανεξάρτητη από το O_2 κυτταροπλασματική διαδικασία οξείδωσης, που περιλαμβάνει συνήθως την κλασσική γλυκόλυση (αναγωγή NAD^+ σε $NADH$ και προϊόν πυροσταφυλικό), η οποία δεν συνεχίζει με την αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων στο O_2 , αλλά με ένα **επιπρόσθετο στάδιο** που καταλήγει στην ατελή αναγωγή του προϊόντος γλυκόλυσης και **οξείδωση του ανηγμένου $NADH$ σε NAD^+** 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



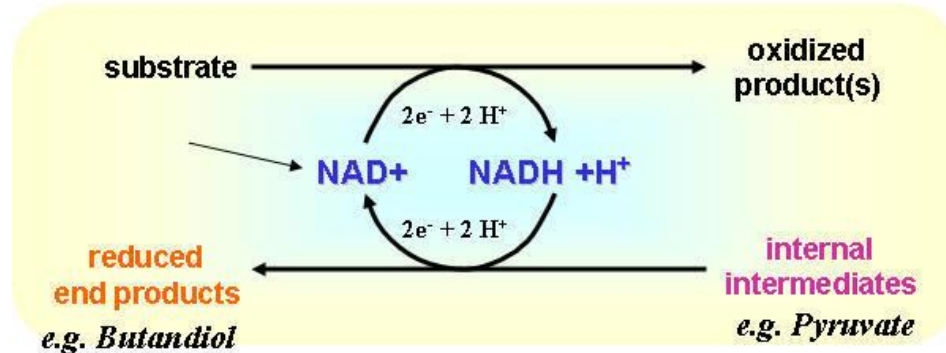
Χαρακτηριστικά των ζυμώσεων από σάκχαρα

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. 2.5.10):
 - οξικό (2), προπιονικό (2), βουτυρικό (2), βουτανόλη (4)

Διαφορά ζύμωσης και αναπνοής

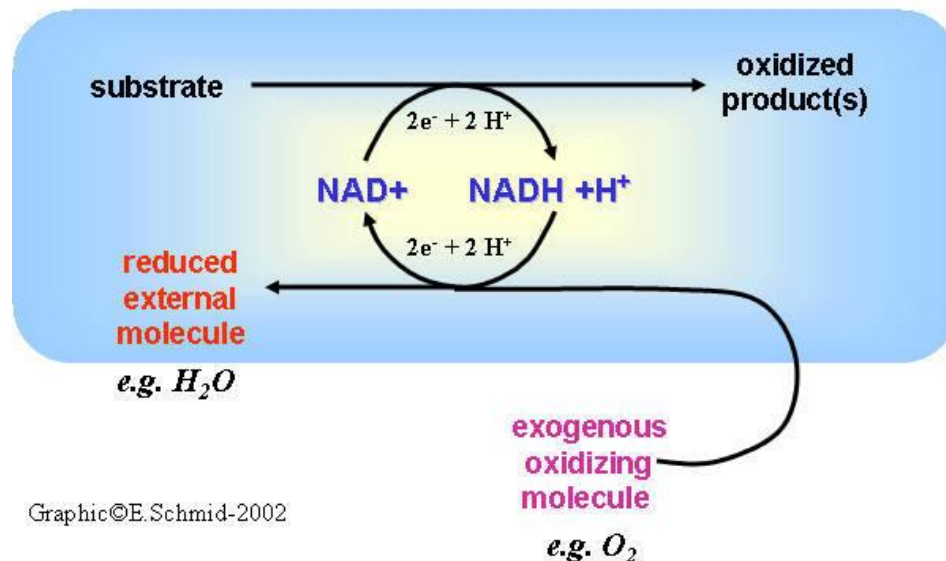
Fermentation:

- 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

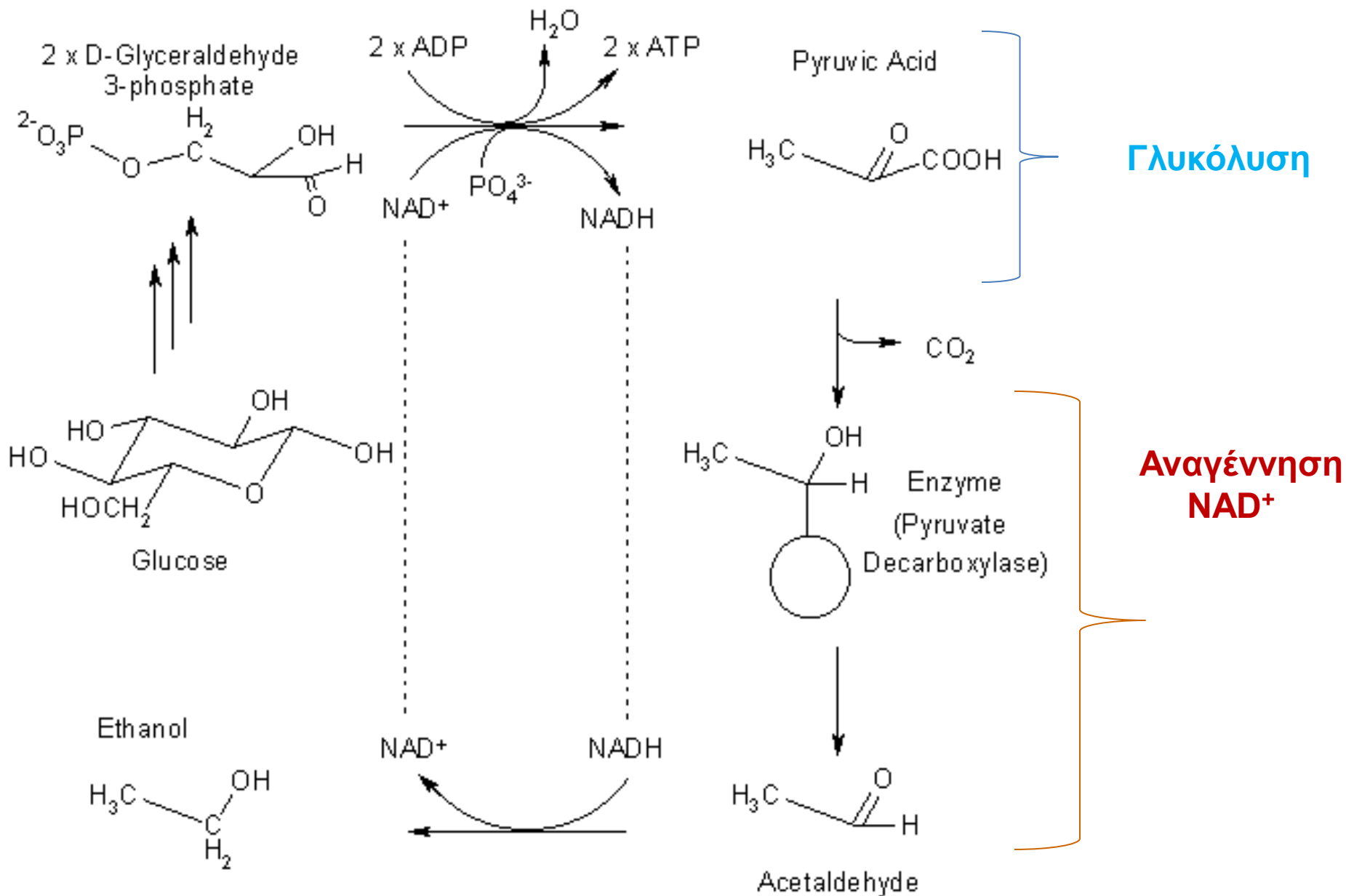


1. Τύπος του οργανισμού
2. Αρχικό υπόστρωμα
3. Συμμετέχοντα ένζυμα

2.5.1. Αλκοολική ζύμωση

- Παράγονται 2 ATP
- Τελικό προϊόντα: αιθανόλη και CO₂
- Χρησιμοποιείται στην παραγωγή τροφίμων
 - Αλκοολούχα ποτά - Γλεύκος, αμυλούχα διαλύματα
 - Ψωμί - Άμυλο
- *Saccharomyces cerevisiae* (ζύμη)

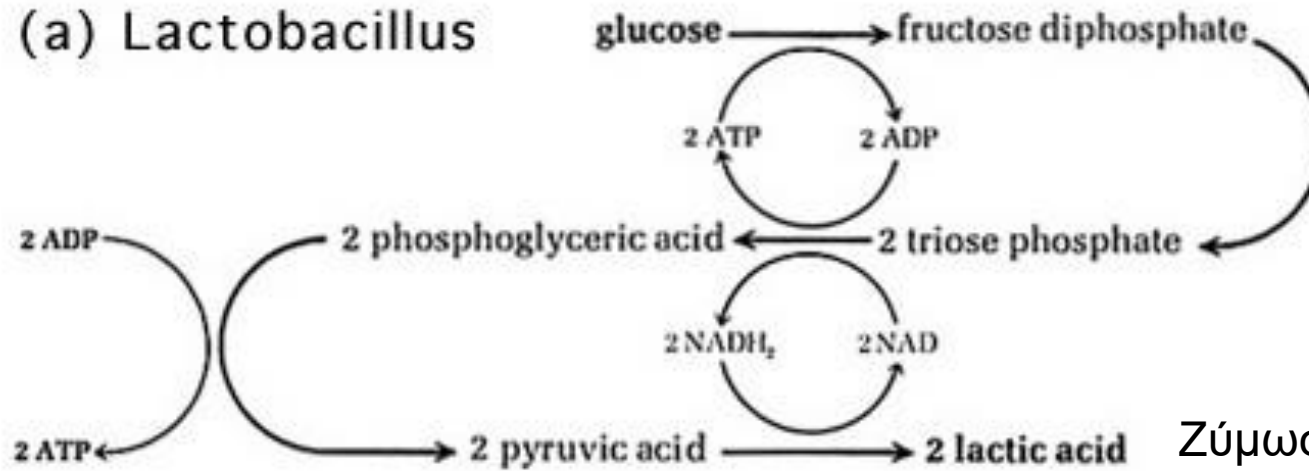
Αλκοολική ζύμωση



2.5.2. Ζύμωση γαλακτικού οξέως

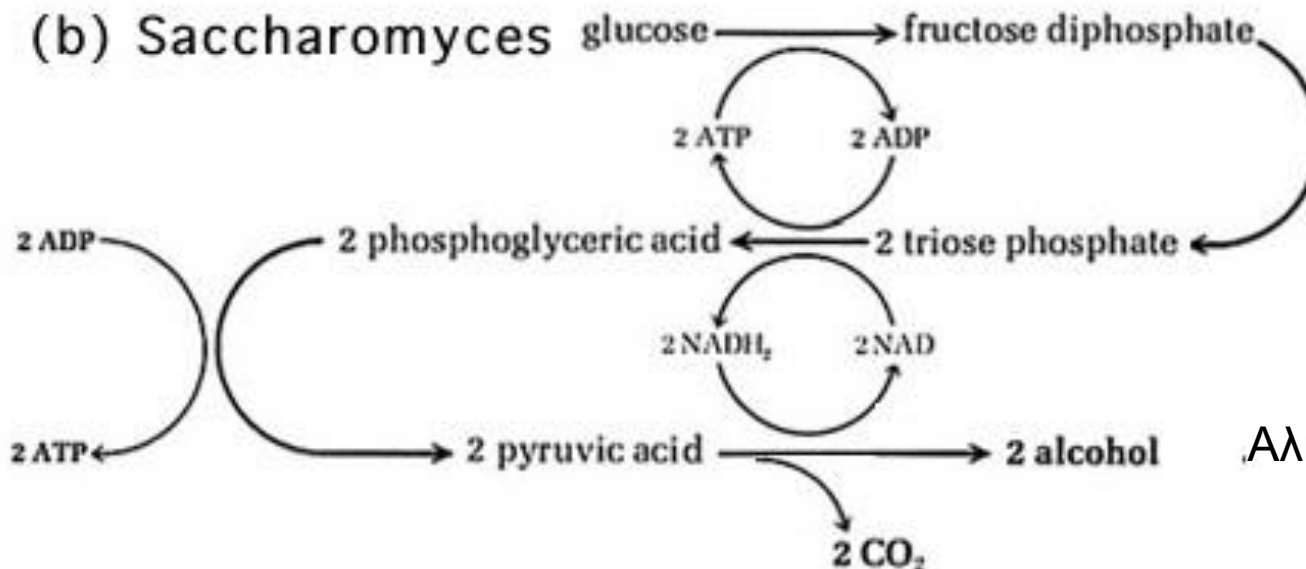
- Παράγονται 2 ATP
- Τελικό προϊόν: γαλακτικό οξύ (*ομαζύμωση*)
- Προκαλεί αλλοίωση των τροφίμων
- Χρησιμοποιείται στην παραγωγή τροφίμων
 - Γιαούρτι - Γάλα
 - Τουρσιά - Αγγούρια
 - Ξινολάχανο - Λάχανο
- Γένη:
 - *Streptococcus*
 - *Lactobacillus*

(a) *Lactobacillus*



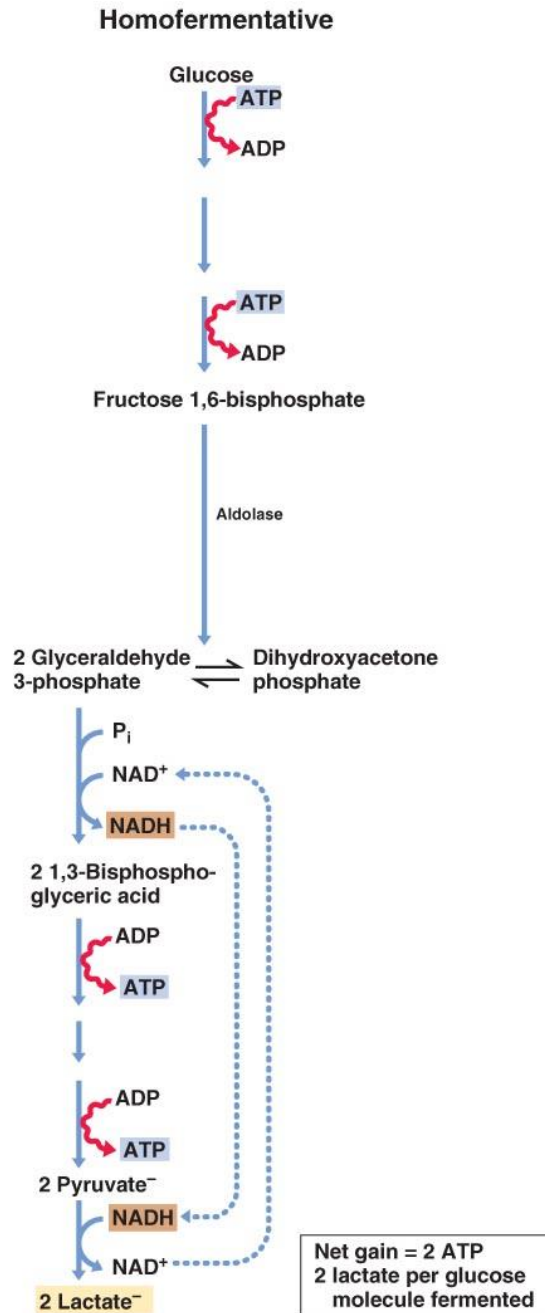
Ζύμωση γαλακτικού οξέως

(b) *Saccharomyces*



Αλκοολική ζύμωση

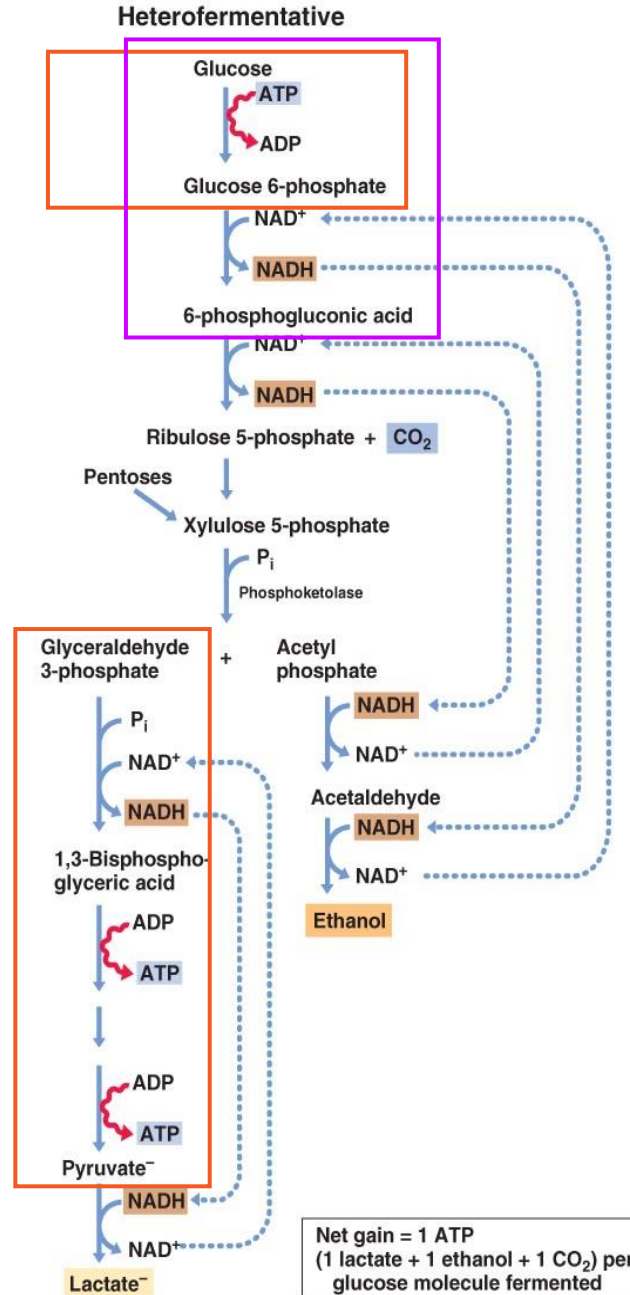
2.5.3. Ομοζύμωση γλυκόζης προς γαλακτικό οξύ



2.5.4. Ετεροζύμωση γλυκόζης προς γαλακτικό οξύ και αιθανόλη

Παράδειγμα τέτοιου οργανισμού;

Κλασσική γλυκόλυση

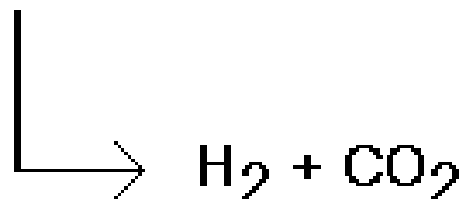
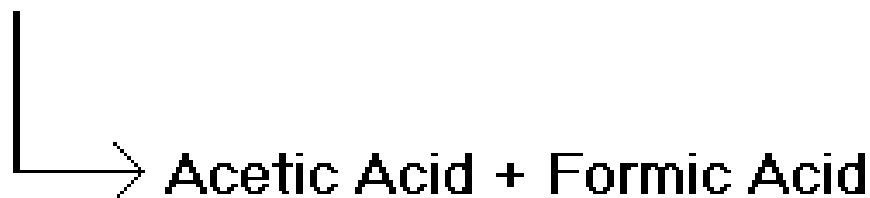
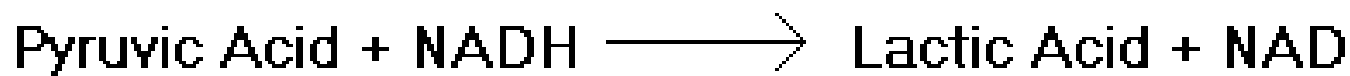


Καταβολική οδός της Φωσφοροκετολάσης

2.5.5. Ζύμωση μικτών οξέων

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

Fermentation Pathways: Mixed acid fermentation

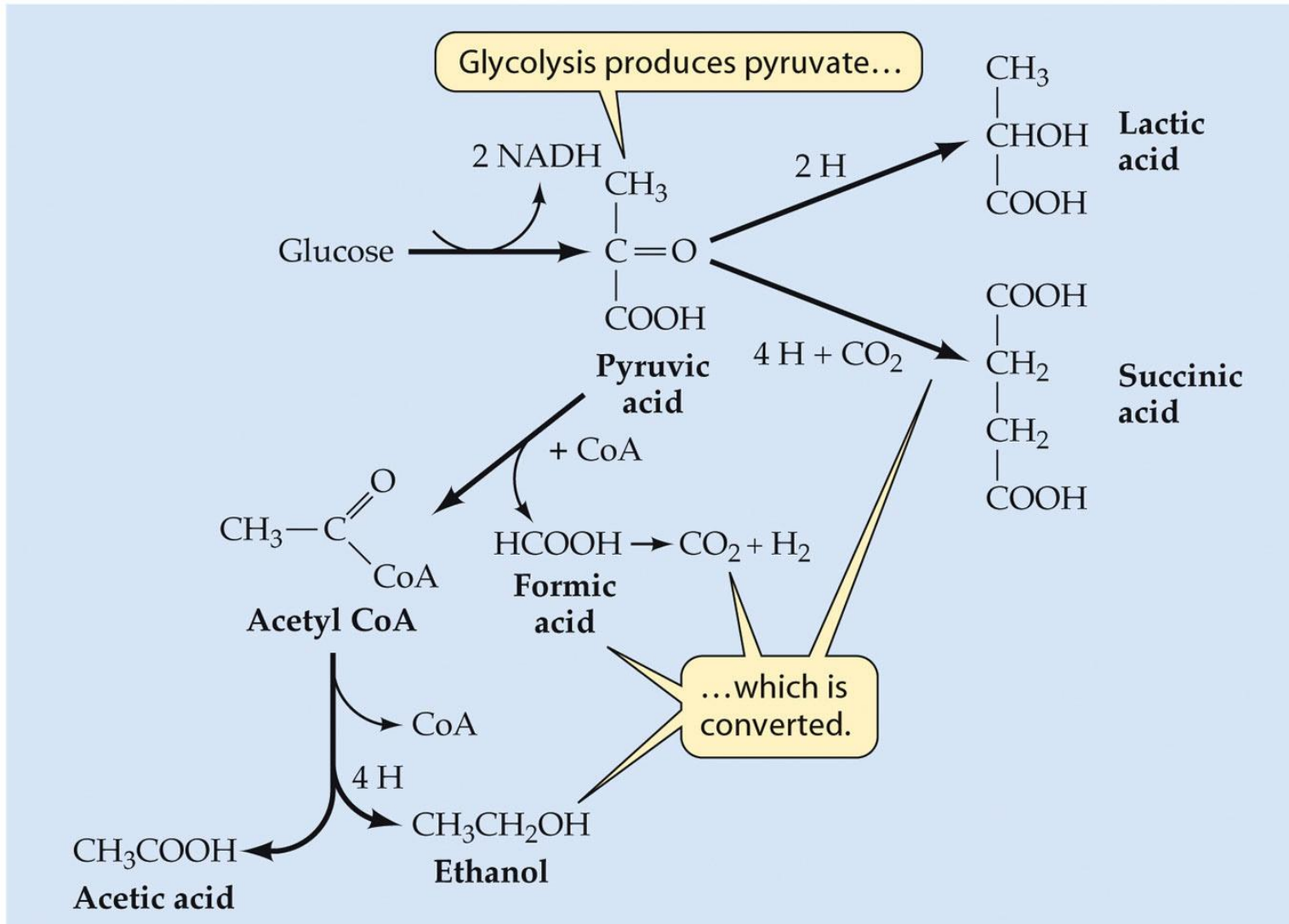


- *Escherichia coli* και άλλα εντεροβακτήρια

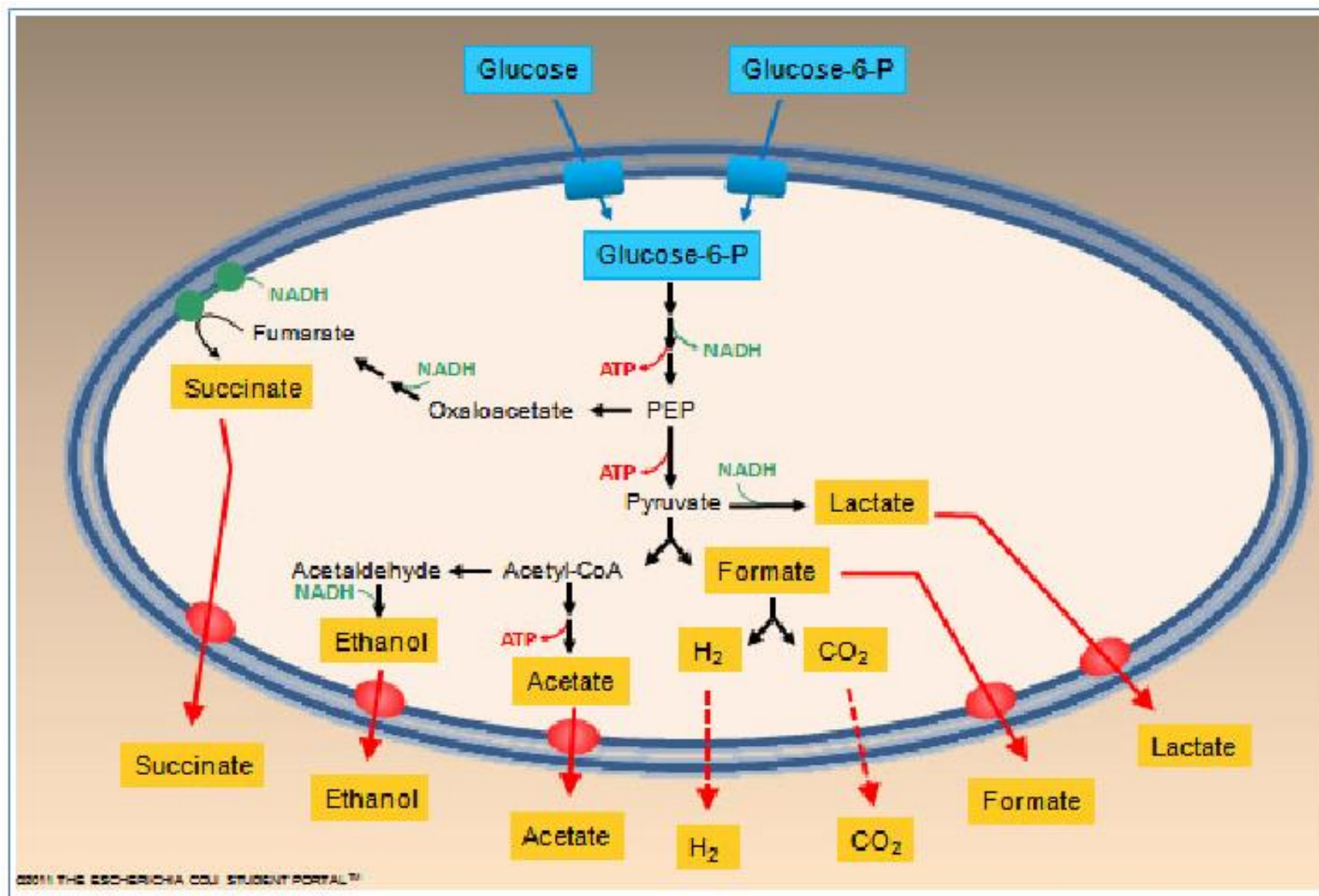
Θυμίζει την Καταβολική οδό της Φωσφοροκετολάσης.

Ζυμώσεις μικτών οξέων

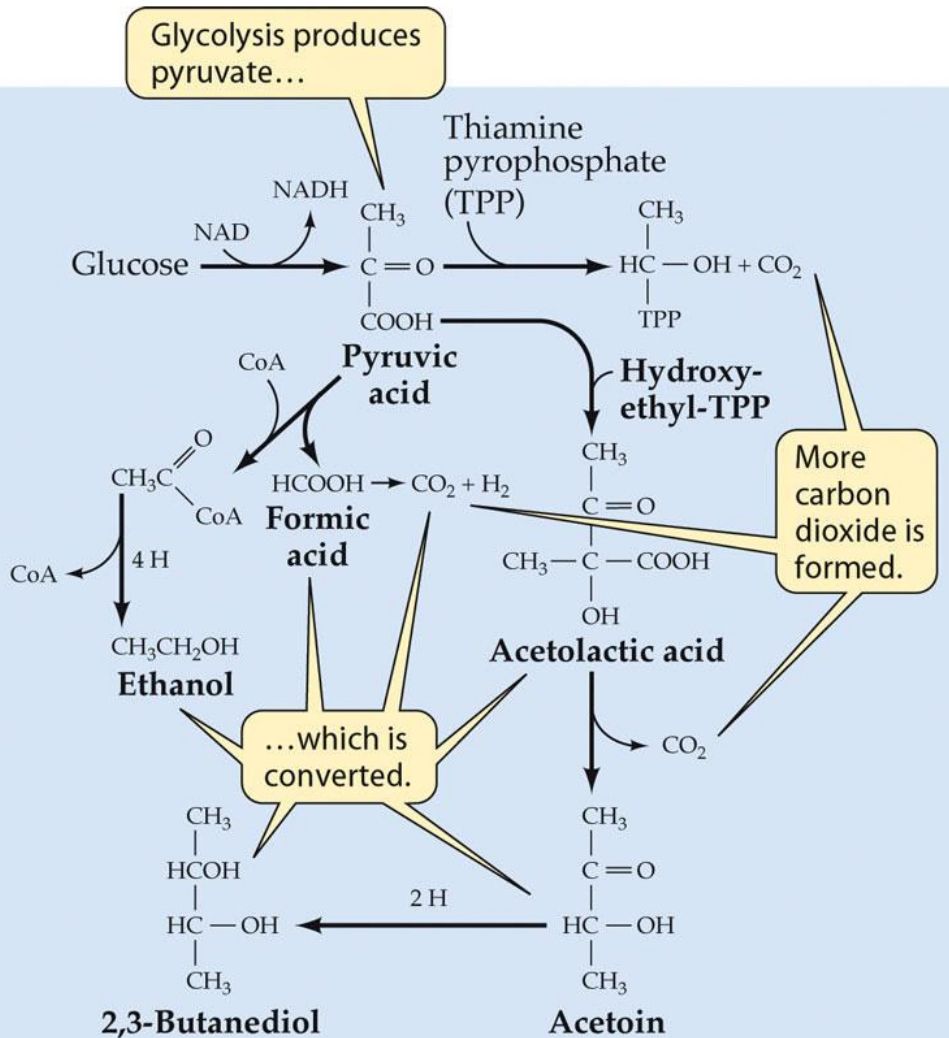
Ζύμωση μικτών οξέων από την *Escherichia coli*. Το παραγώμενο από γλυκόλυση (Embden-Meyerhof) πυροσταφυλικό, καταβολίζεται σε ένα μίγμα ενώσεων οξέων.



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



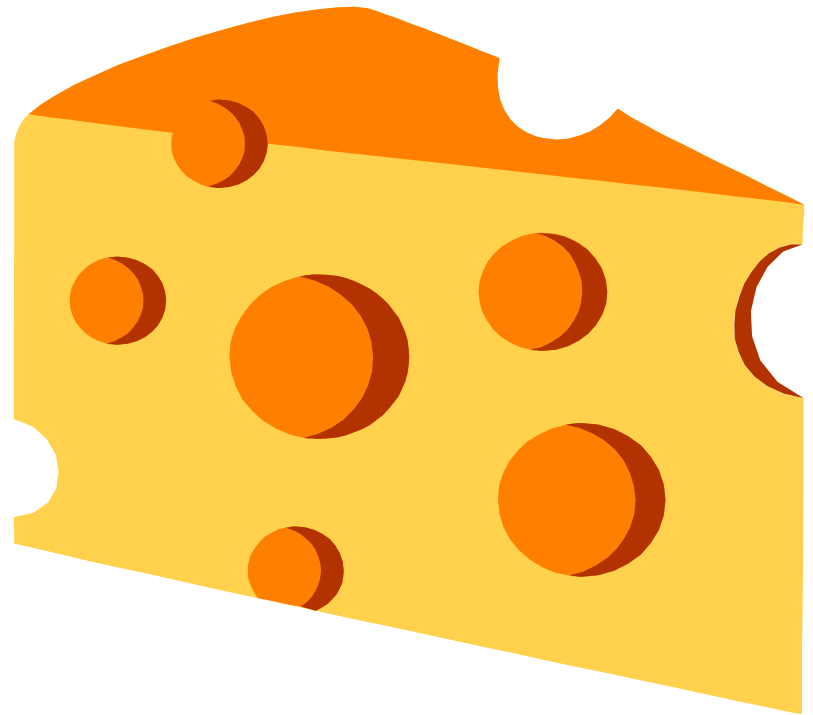
2.5.6. Ζύμωση 2,3-βουτανεδιόλης



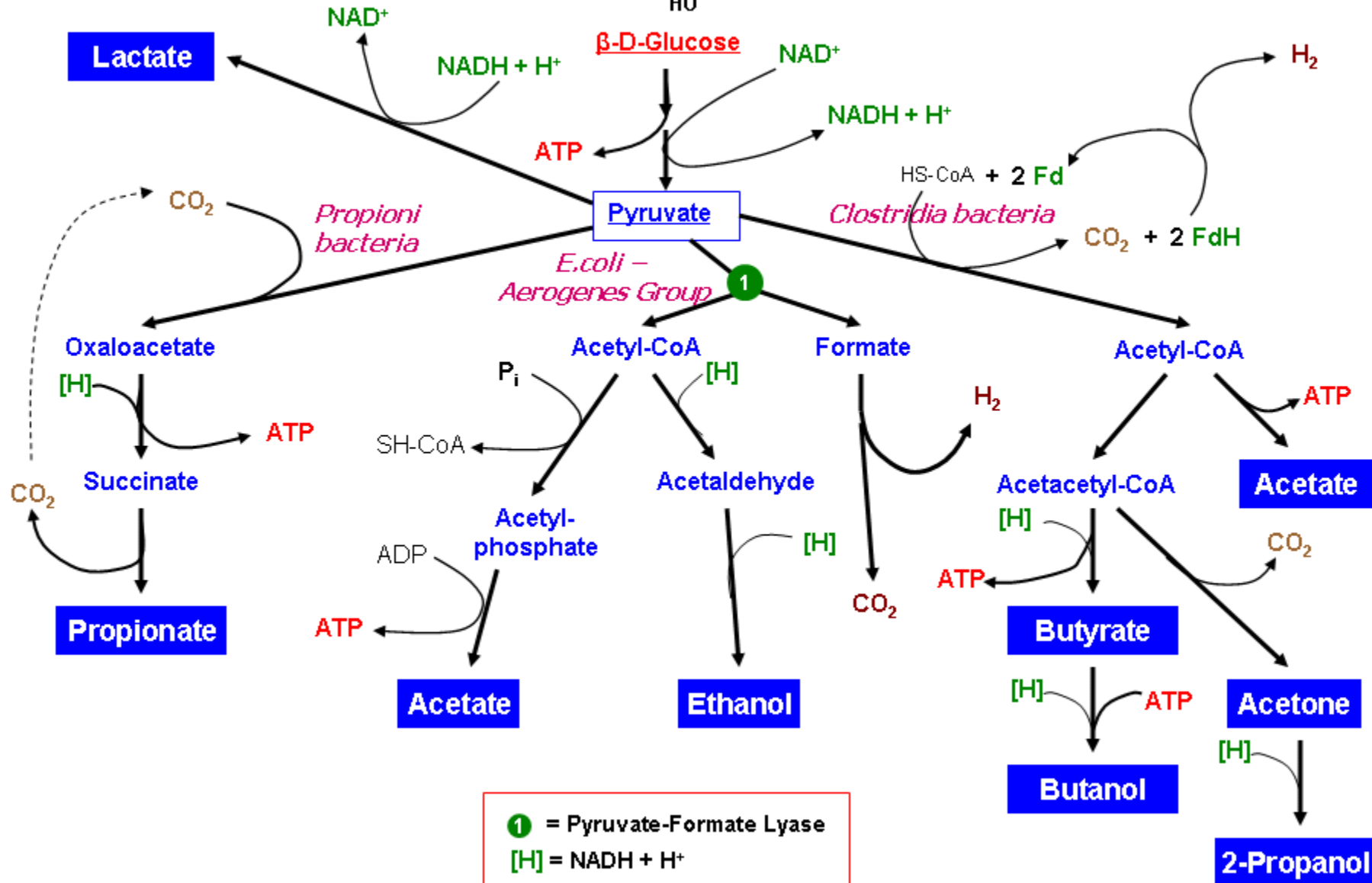
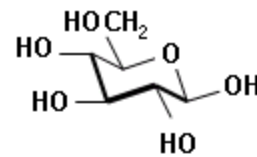
Ζύμωση μικτών οξέων, αλλά με περισσότερα ουδέτερα προϊόντα (2,3-βουτανεδιόλη, αιθανόλη), CO_2 και H_2 .

2.5.7. Ζύμωση προπιονικού οξέως

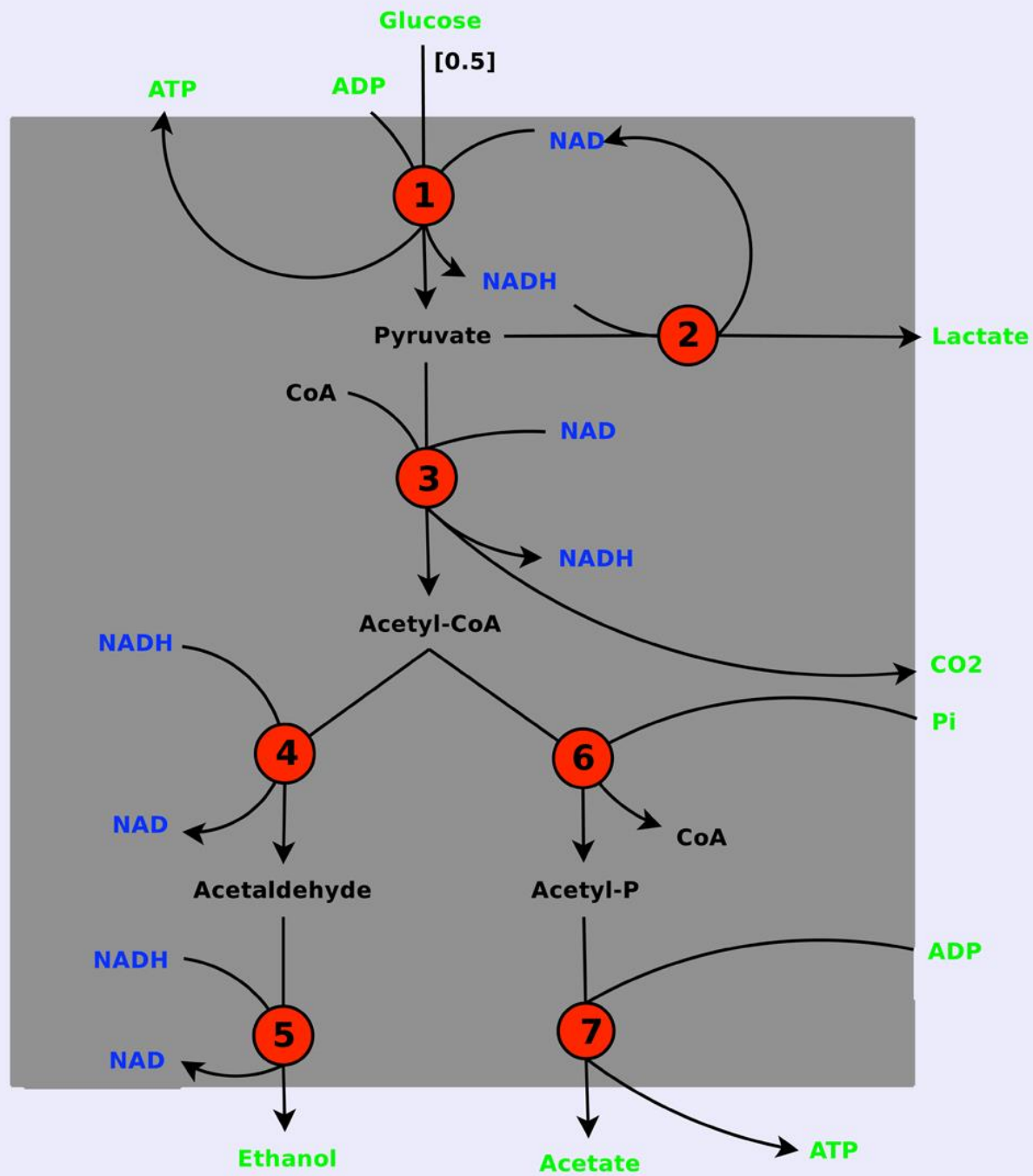
- Παράγονται 2+2 ATP
- Τελικά προϊόντα :
 - Προπιονικό οξύ
 - CO_2
- *Propionibacterium sp.*



Σύνοψις



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)

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

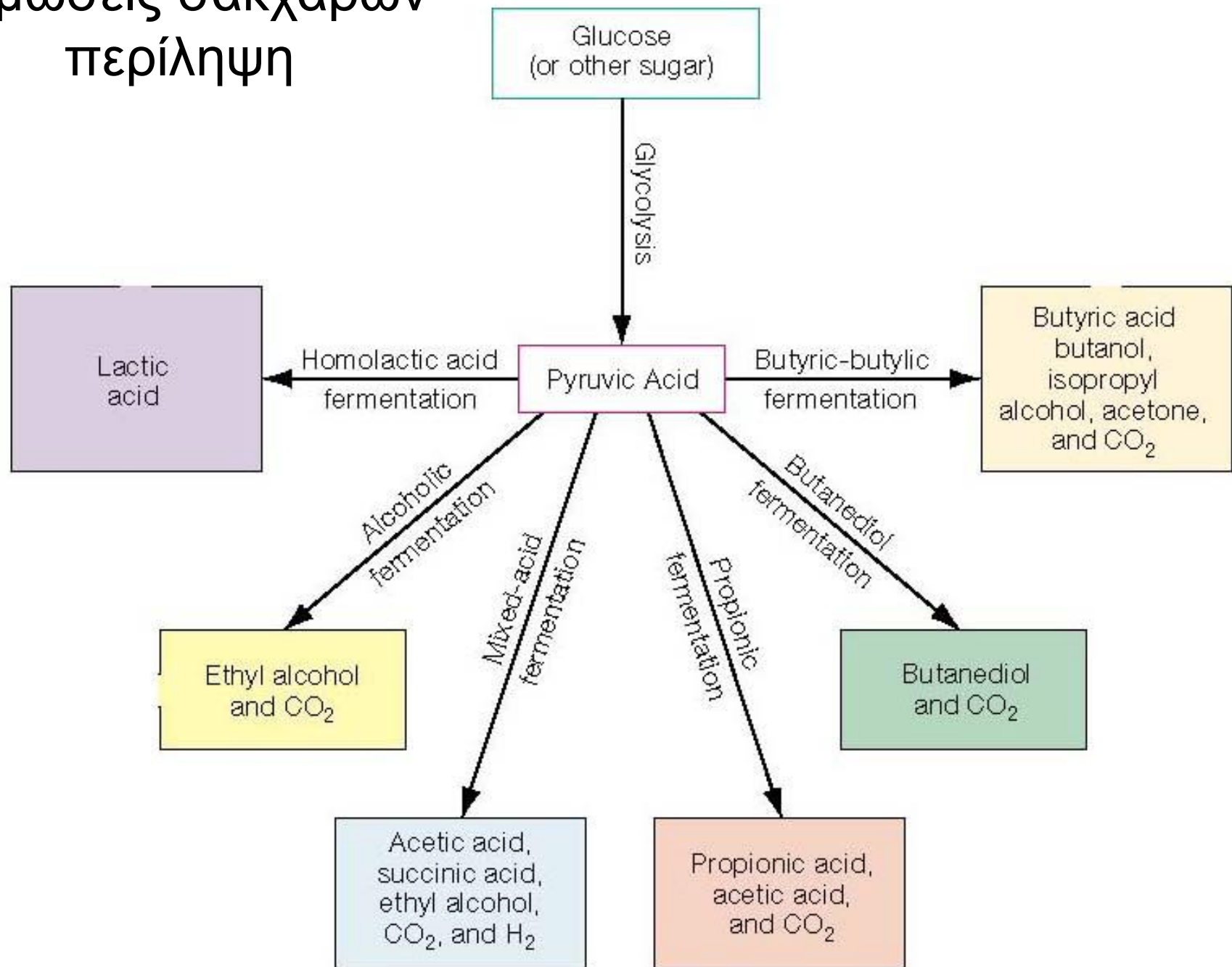
$$\Sigma = \frac{J_3 J_5 J_6 \epsilon^4_{ACAL} \epsilon^7_{ACP} \epsilon^6_{COA} \epsilon^5_{NADH} \epsilon^3_{PYR}}{COA \ NADH} + \frac{J_2 J_5 J_6 \epsilon^4_{ACAL} \epsilon^7_{ACP} \epsilon^6_{COA} \epsilon^5_{NADH} \epsilon^2_{PYR}}{COA \ NADH} \\ - \frac{J_1 J_5 J_6 \epsilon^4_{ACAL} \epsilon^7_{ACP}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

Metabolic control analysis

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

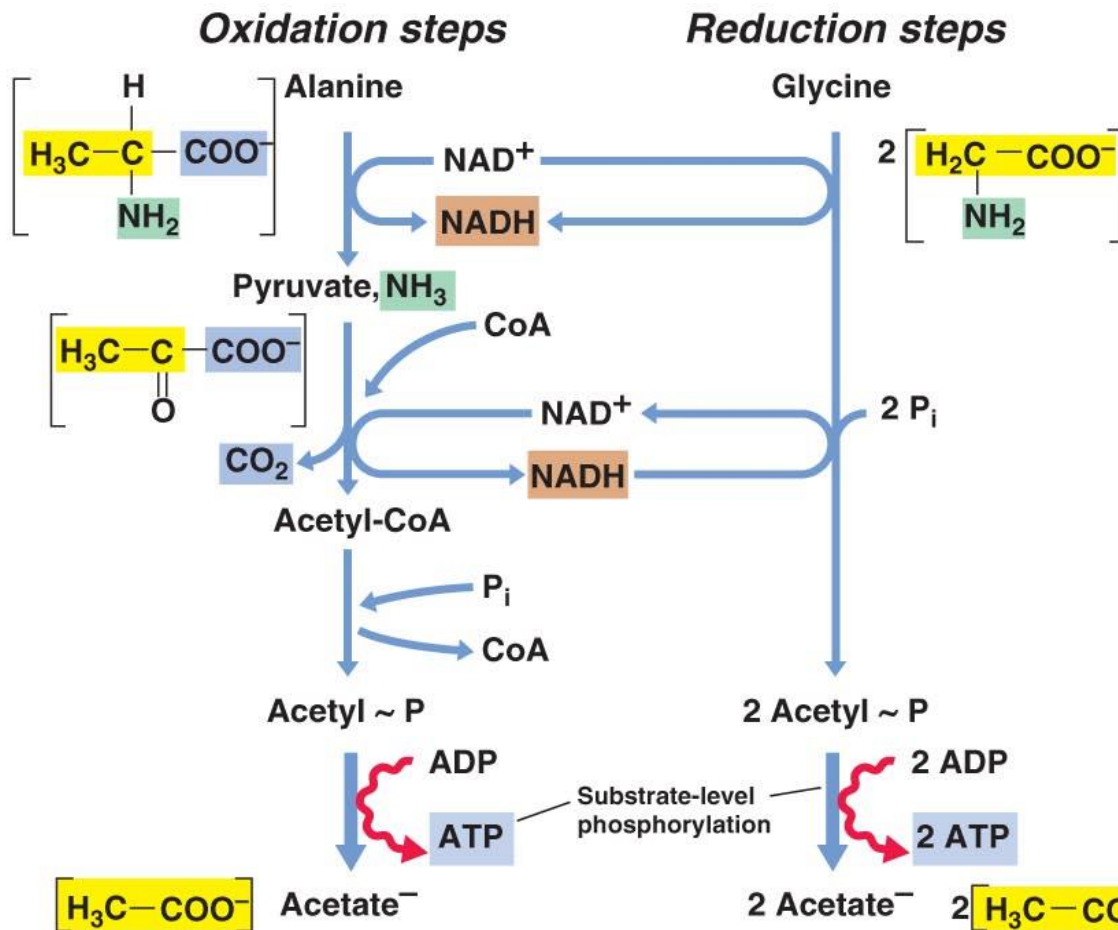
with the denominator Σ given by: (56 terms)

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

2.5.10. Δευτερογενείς ζυμώσεις

- Δευτερογενής ζύμωση

Ο καταβολισμός των προϊόντων της πρωτογενούς ζυμώσεως

– *Kluyveromyces kluyveri*

Αιθανόλη + οξικό $\rightarrow$ καπροϊκό + βουτυρικό + vATP

– *Propionibacterium*

Γαλακτικό $\rightarrow$ προπιονικό + οξικό + vATP

Γιατί οι δευτερογενείς ζυμώσεις;

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

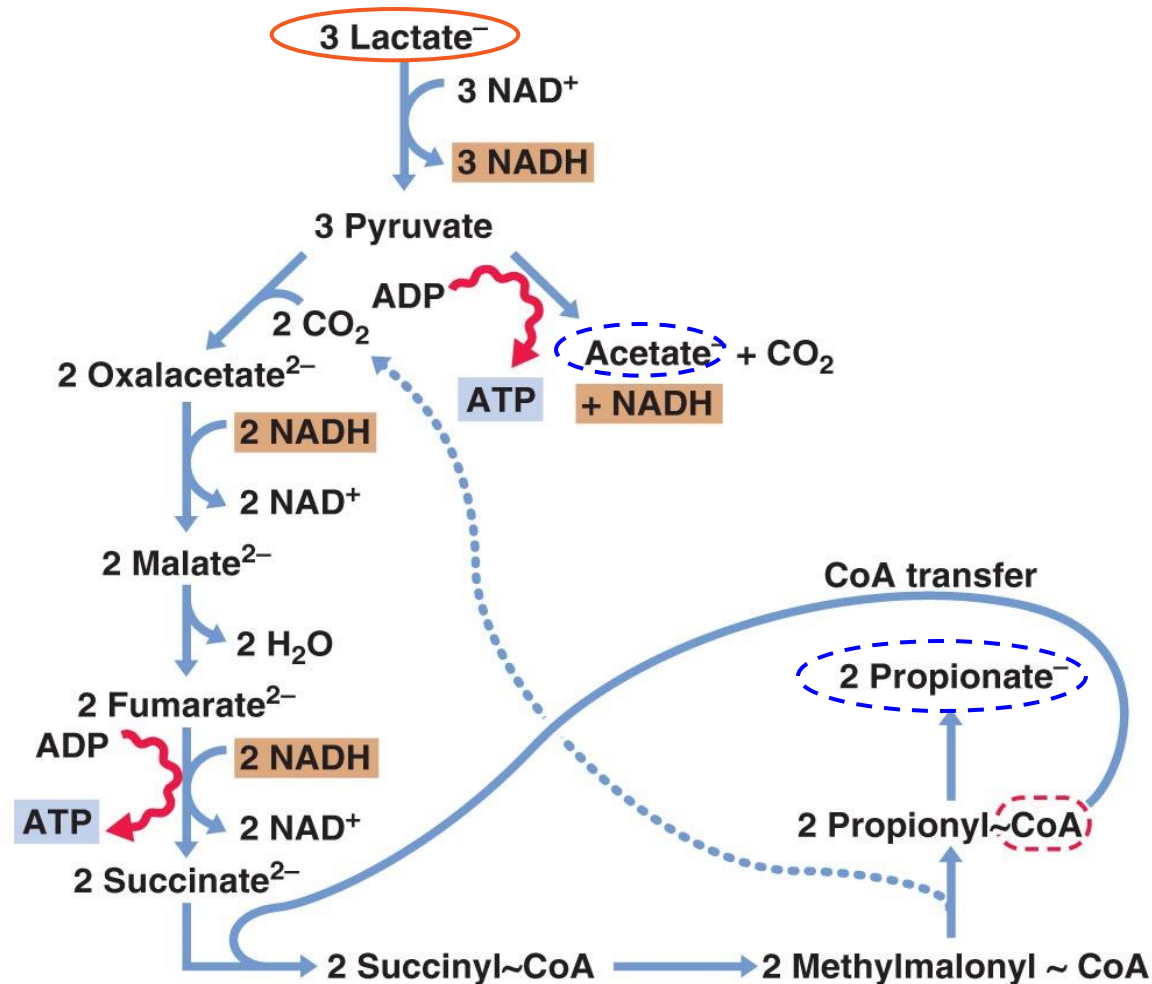
+ 2 ATPs = +63 kJ/mol

-133 kJ/mol έμειναν στο γαλακτικό

Απώλεια ενέργειας!

Οι δευτερογενείς ζυμώσεις εξασφαλίζουν περισσότερη ενέργεια (ATP) από τον καταβολισμό των προϊόντων της πρωτογενούς ζυμώσεως.

Ζύμωση προπιονικού οξέως στο *Propionibacterium*



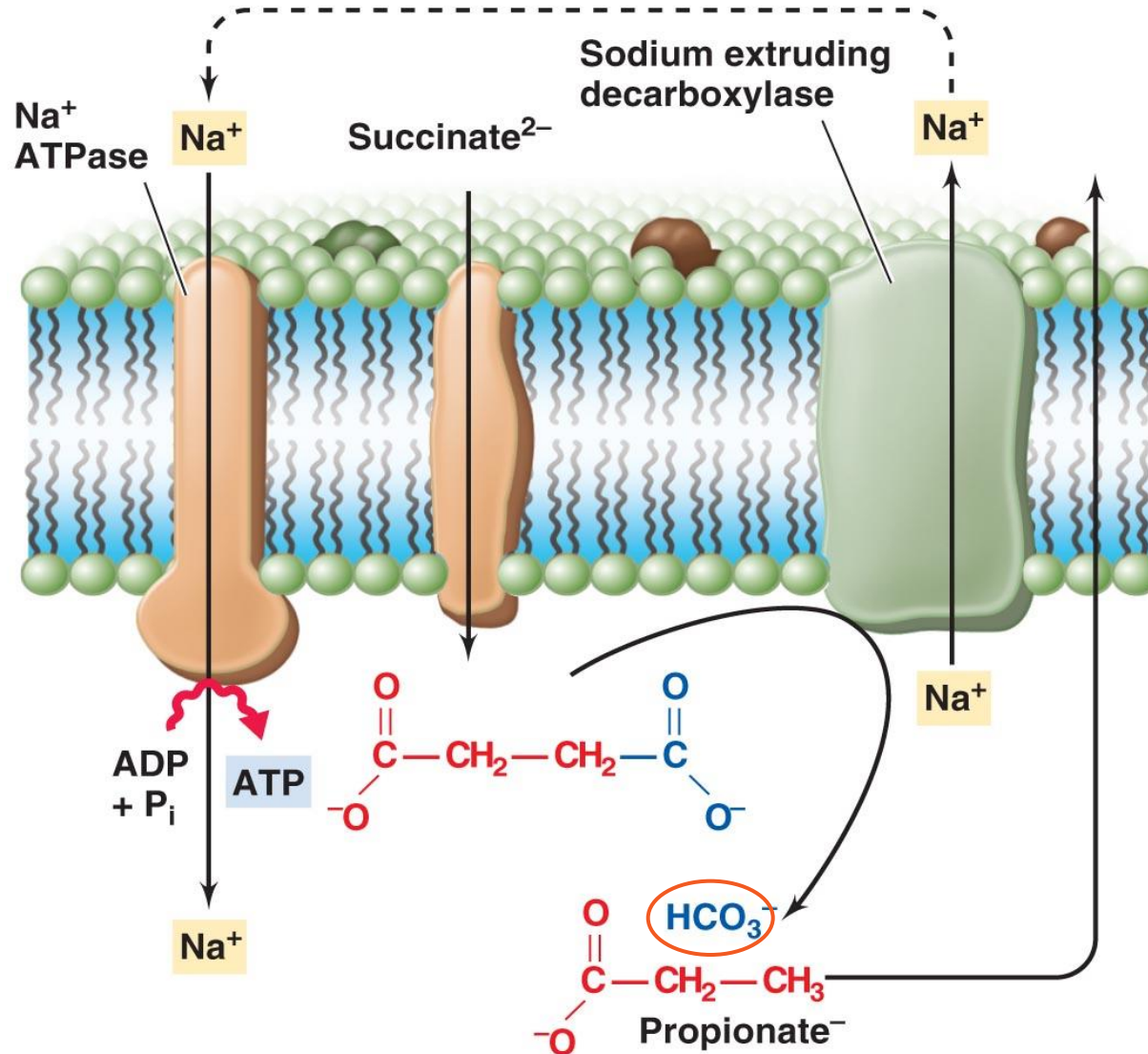
Overall reaction:



2.5.11. Ζυμώσεις που δεν δίνουν φωσφορυλίωση σε επίπεδο υποστρώματος

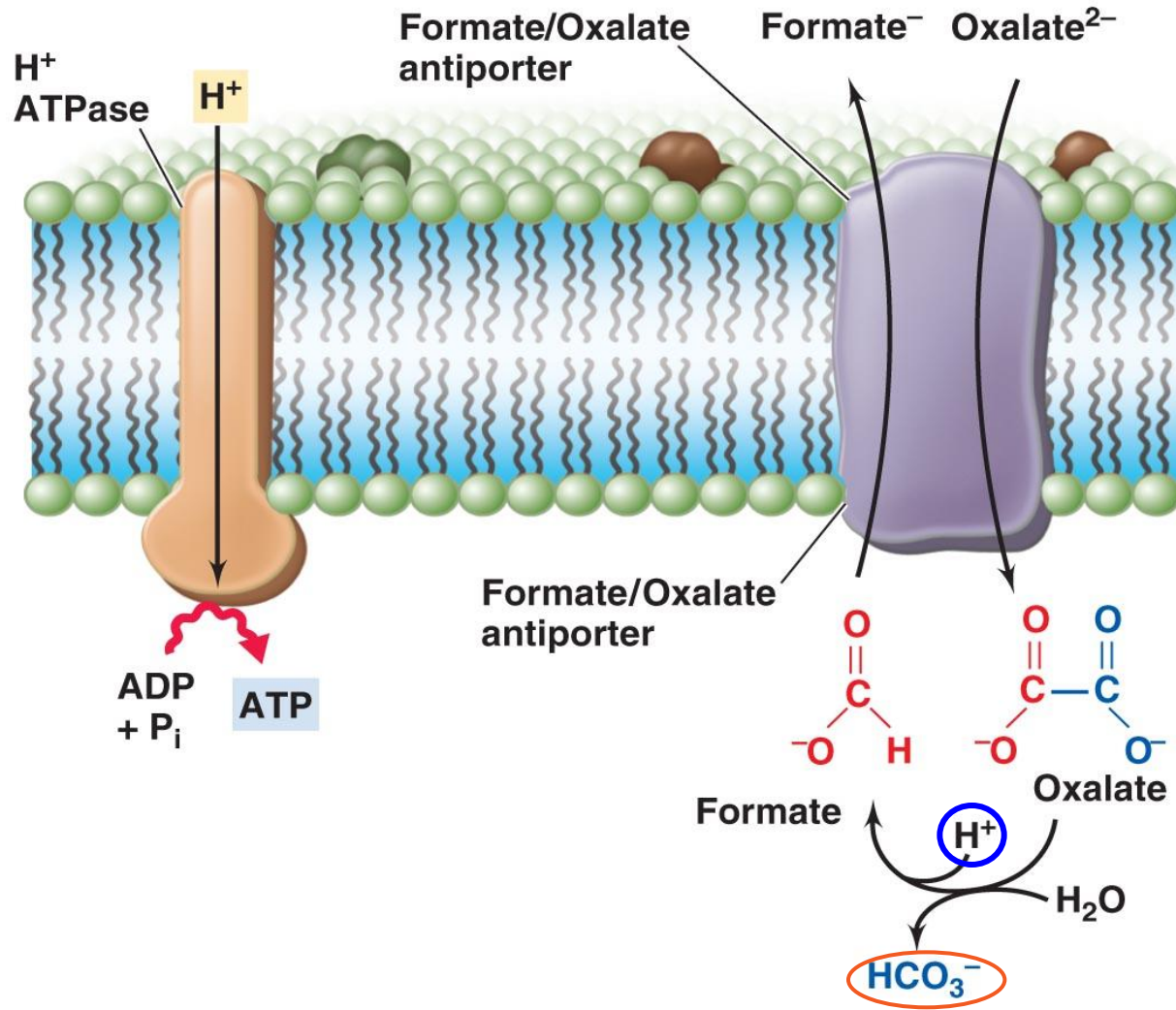
- Οι ζυμώσεις ορισμένων ενώσεων δε δίνουν αρκετή ενέργεια για τη σύνθεση ATP
 - Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο καταβολισμός της ενώσεως μπορεί να συνδεθεί με αντλίες ιόντων που εξασφαλίζουν χημειώσμωση πρωτονίων ή ιόντων νατρίου

Ζύμωση ηλεκτρικού από το *Propionigenium modestum*



Η εξεργονική αποκαρβοξυλίωση του ηλεκτρικού δίνει την ενέργεια για τη μεταφορά Na^+ στον εξωτερικό χώρο και τη δημιουργία κλίσης $[\text{Na}^+]$.

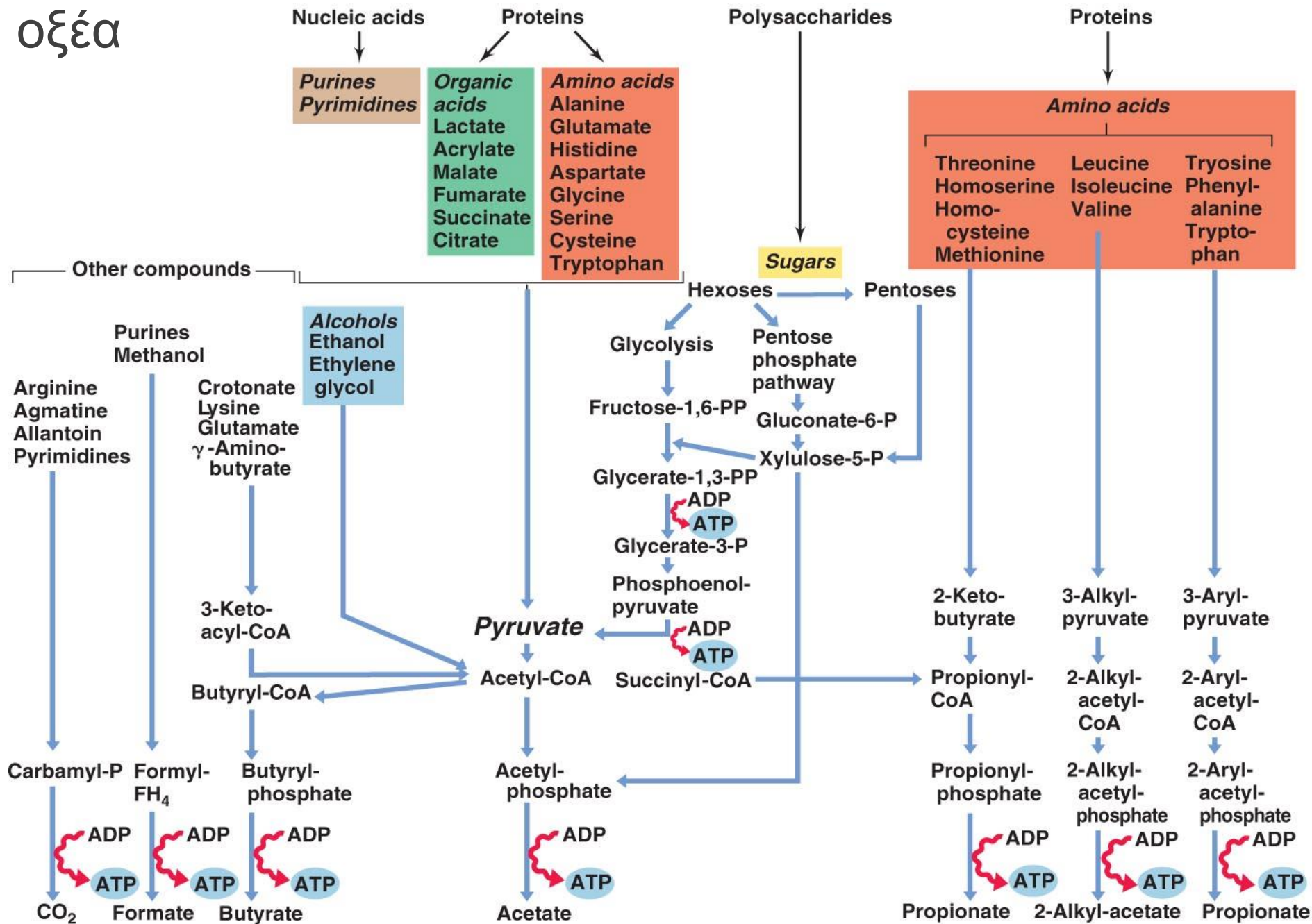
Ζύμωση οξαλικών από το *Oxalobacter formigenes*



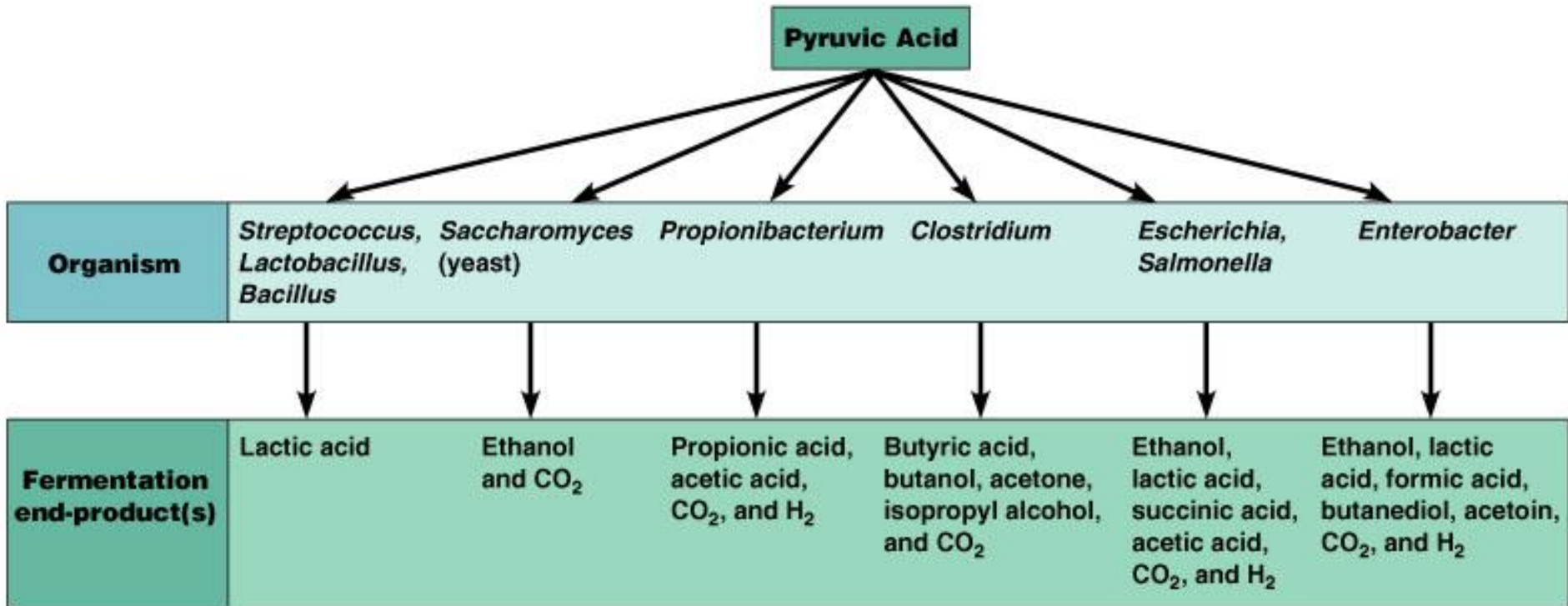
(b)

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



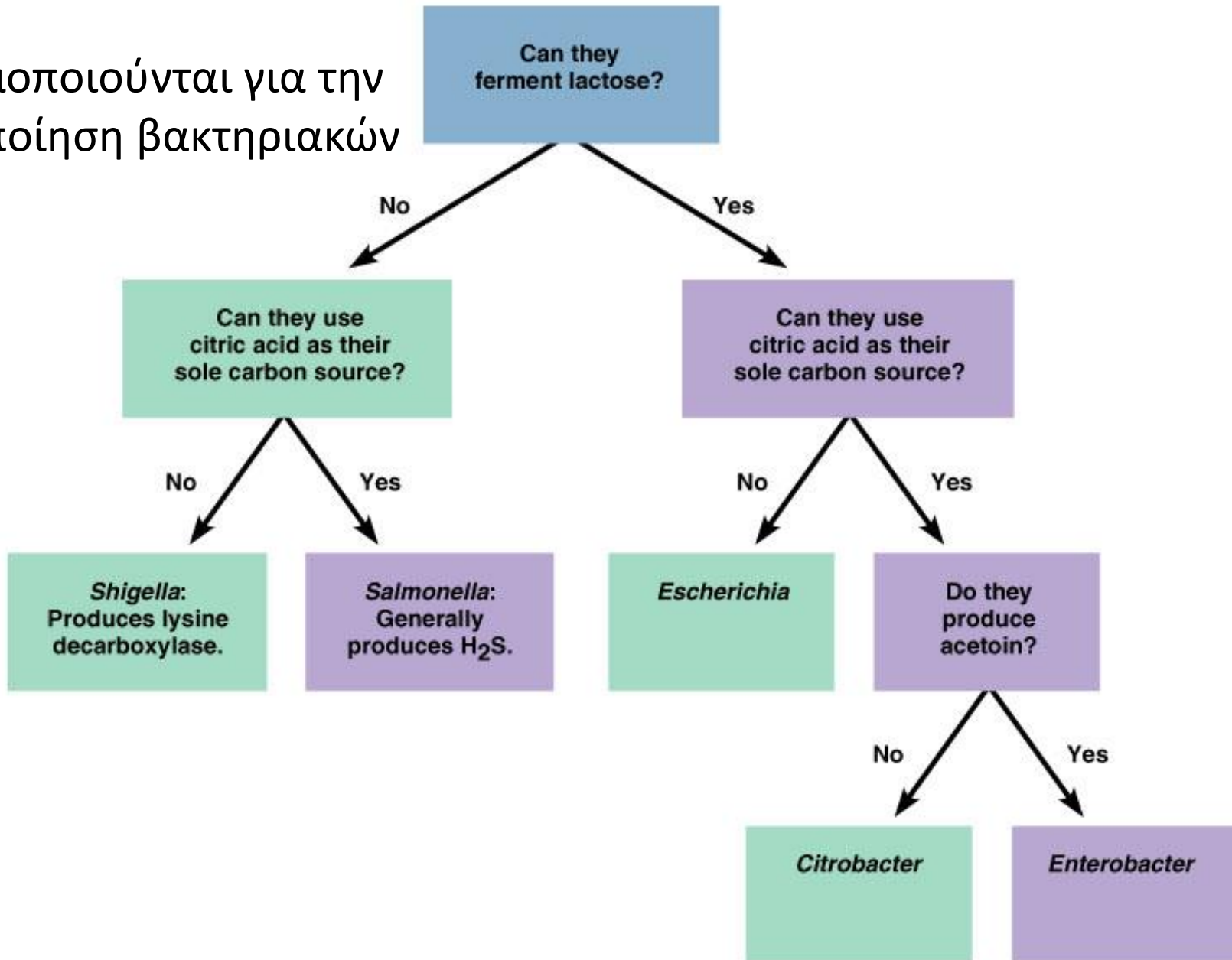
Ζυμώσεις σακχάρων-οργανισμοί



(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:

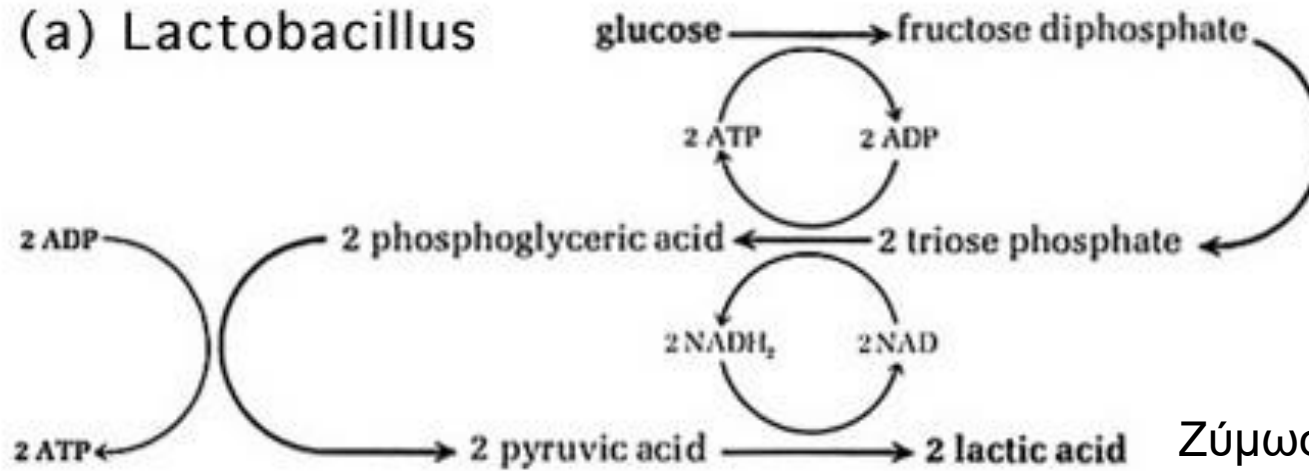
1. Αναπνοή

- 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 χημειώσμωση δημιουργείται ATP.

2. Ζυμώσεις

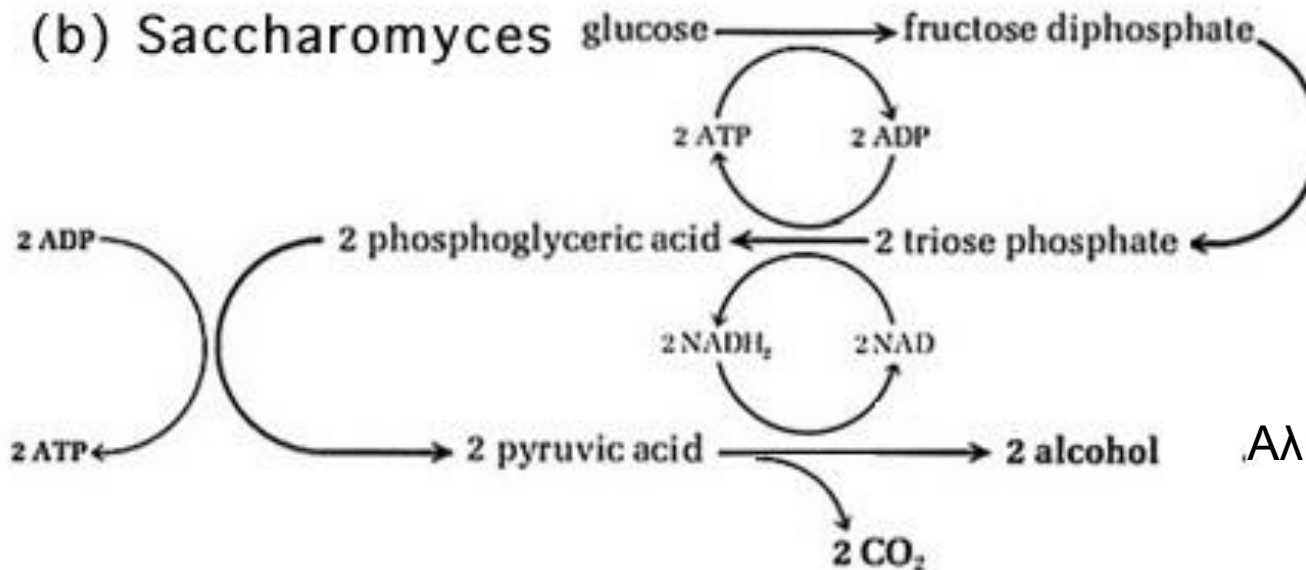
- Κοινός μεταβολικός δρόμος γλυκόλυσης και αναεροβικής οξείδωσης (συνήθως πυροσταφυλικού οξέως) με ανακύκλωση $NAD^+/NADH$. Δεν έχουμε χημειώσμωση. Το ATP δημιουργείται στη γλυκόλυση.

(a) *Lactobacillus*



Ζύμωση γαλακτικού οξέως

(b) *Saccharomyces*

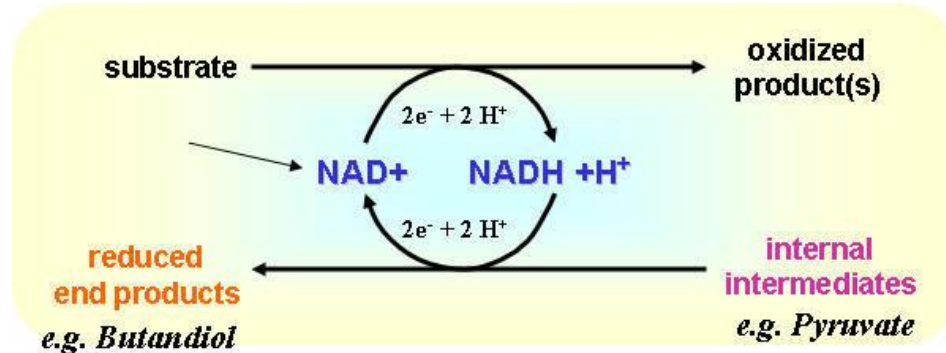


Αλκοολική ζύμωση

Διαφορά ζύμωσης και αναπνοής

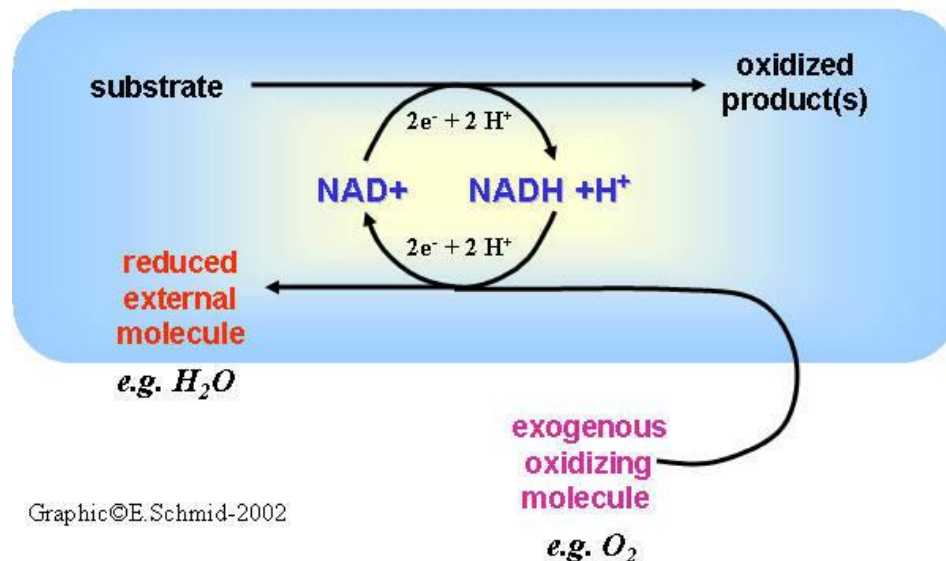
Fermentation:

- 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 (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

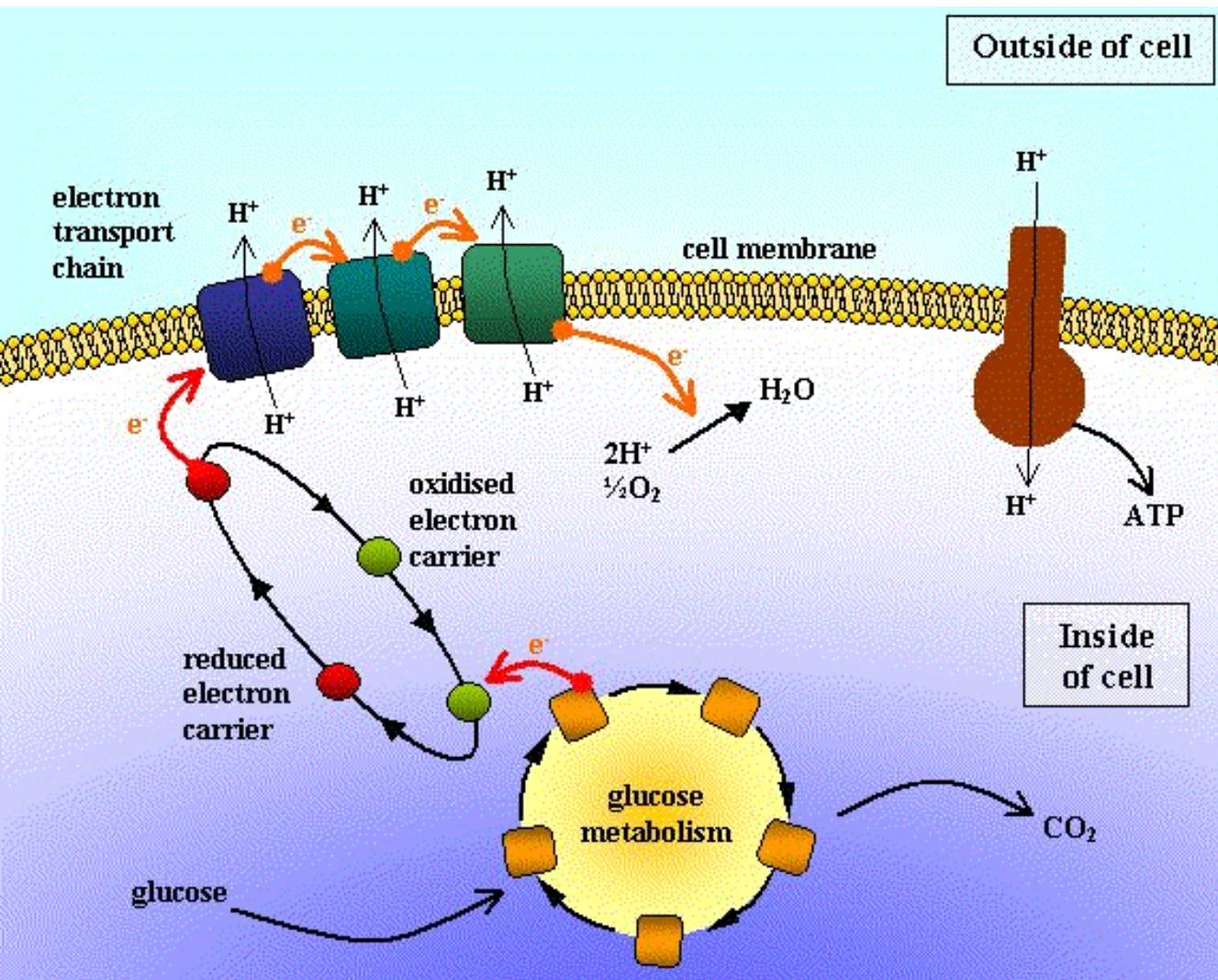
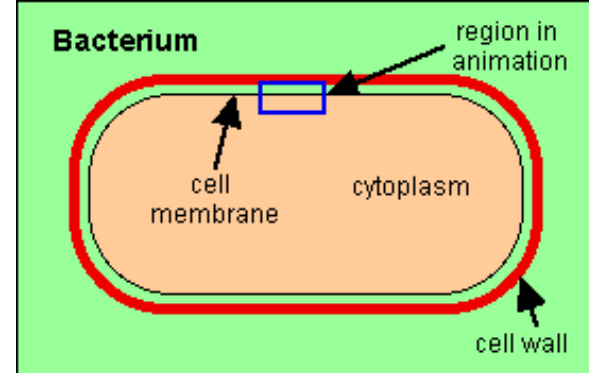
Αναγέννηση ATP από την κλίση H^+ εγκαρσίως της κυτταροπλασματικής μεμβράνης (πυροσταφυλικό και μετά). Παράδειγμα: αναπνευστική αλυσίδα.

2.6. Αναεροβική αναπνοή

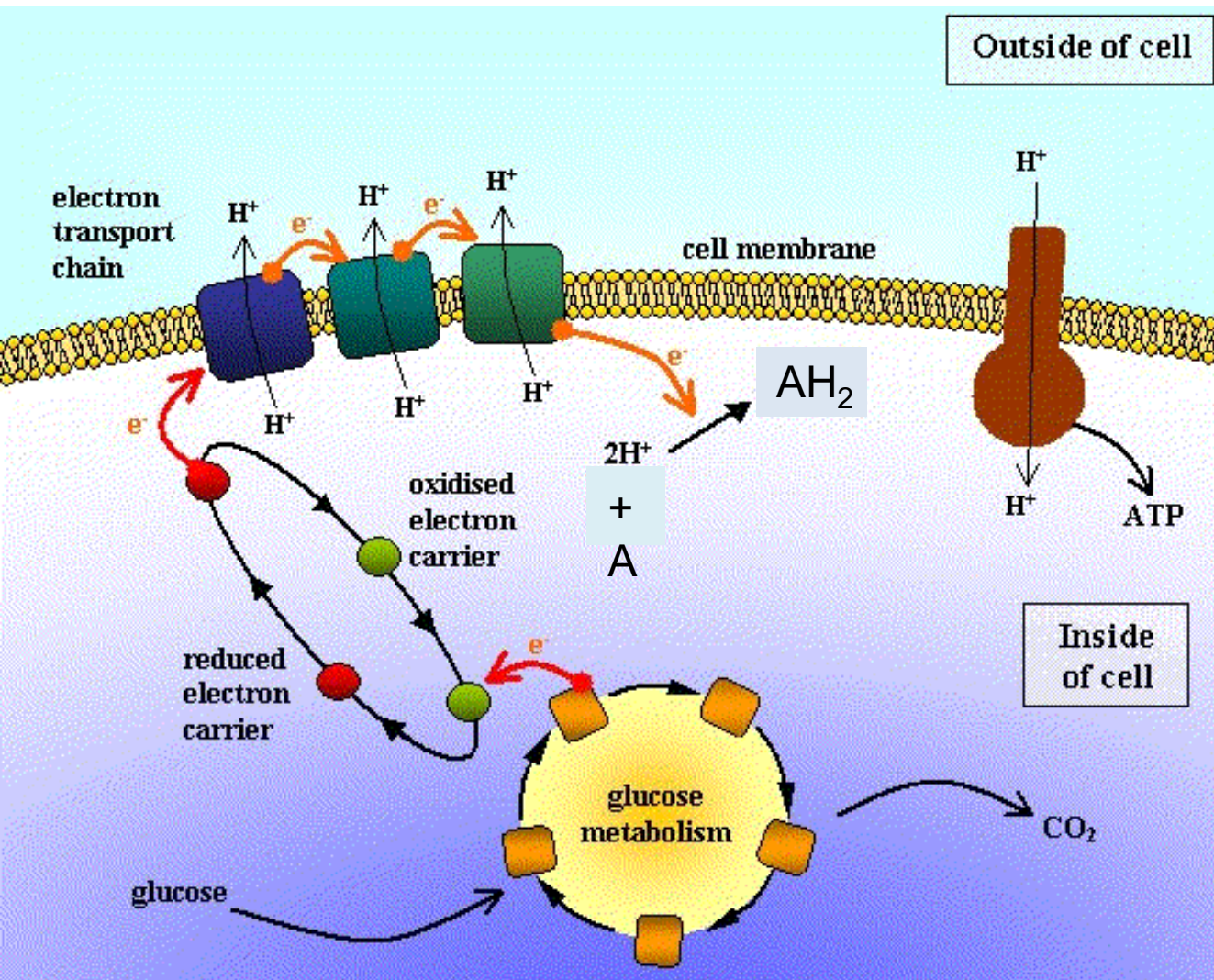
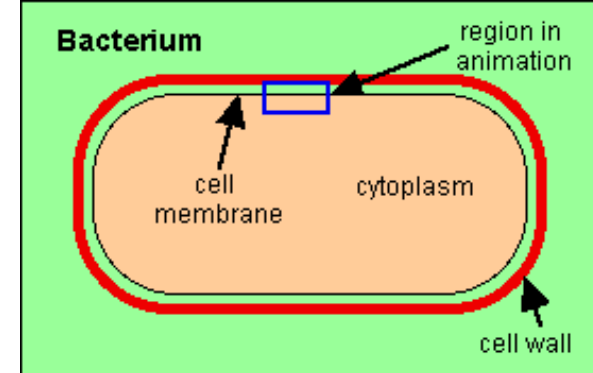
- 2.6.1. Αναεροβικός μεταβολισμός: Γενικές αρχές
- 2.6.2. Αναγωγή νιτρικών και απονιτρίωση (denitrification)
- 2.6.3. Αναγωγή θειικών και θείου
- 2.6.4. Αναγωγή CO₂ σε οξικό
- 2.6.5. Μεθανογένεση
- 2.6.6. Αναγωγή πρωτονίων
- 2.6.7. Άλλοι αποδέκτες ηλεκτρονίων
- 2.6.8. Συνδυαστική αναεροβική οξείδωση 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

Χημειώσμωση σε βακτήρια παρουσία O_2

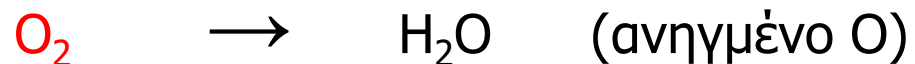


Γενικευμένη Χημειώσωση στα βακτήρια

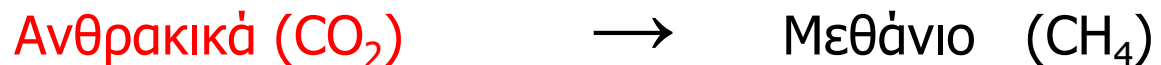
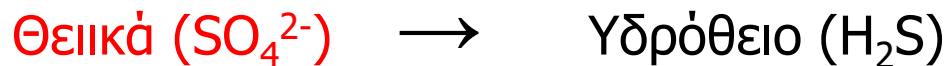
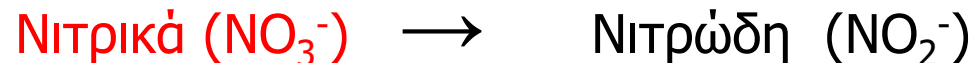


2.6.1. Αναεροβικός μεταβολισμός: Γενικές αρχές

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



- αλλά σε:

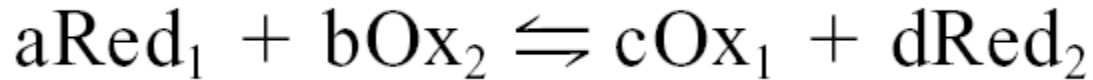


- Η γενική αρχή λειτουργίας των αεροβικών και αναεροβικών συστημάτων είναι γενικά η ίδια, ωστόσο η αναεροβική αναπνοή δίνει λιγότερη ενέργεια διότι η διαφορά δυναμικού μέχρι το μοριακό οξυγόνο είναι μεγαλύτερη.

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 (ΔE) των εμπλεκόμενων μορίων.
- Οι διαφορές δυναμικού θα δώσουν τις διαφορές στην ελεύθερη ενέργεια (**ΔE , εξίσωση Nernst**).

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



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

ΔE

Η ΔG εξαρτάται από την ΔE_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^+



$$\Delta G^{0'} = -n F \Delta E'_0 = -2 \times 23,06 \times 1,14 = -52,6 \text{ kcal/mol}$$

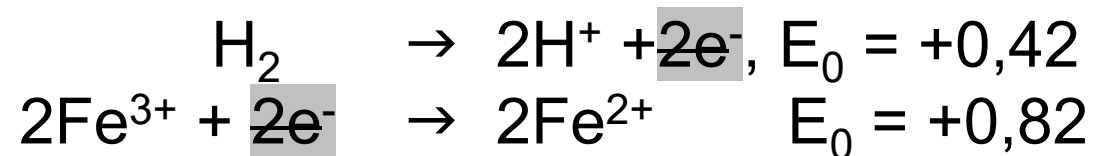
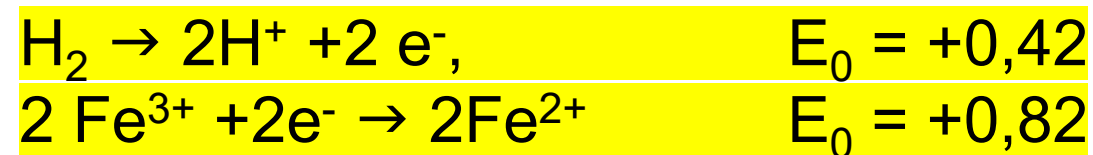
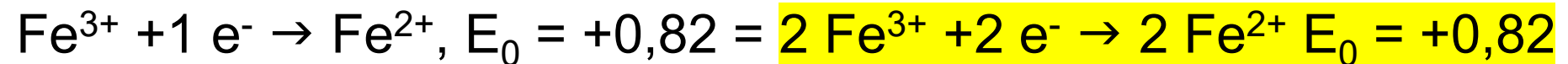
$(\Delta G < 0)$

Άρα αυτή η αντίδραση ευνοείται θερμοδυναμικά.
Γίνεται αυθόρμητα;

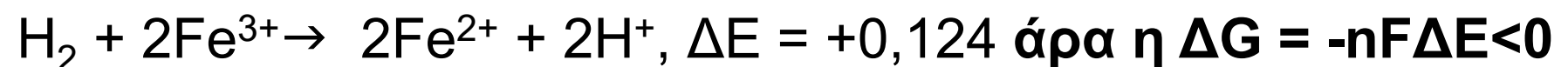
Παράδειγμα ροής ηλεκτρονίων από H_2 σε Fe^{3+}

Το H_2 οξειδώνεται σε H^+ και το Fe^{3+} ανάγεται σε Fe^{2+}

Δυναμικά αναγωγής:



Συνολική αντίδραση:

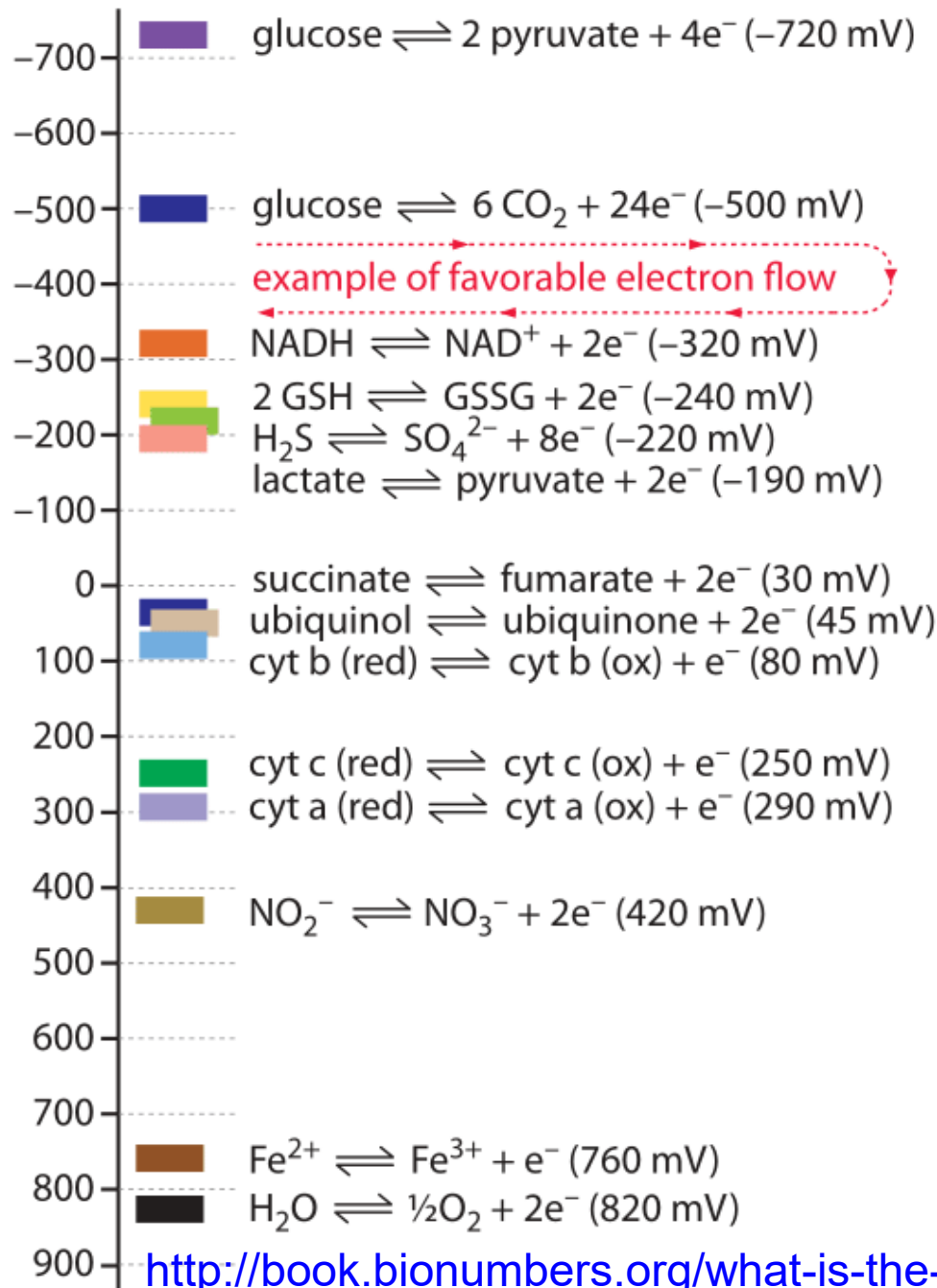


Redox potential [mV]

+810	—	aerobic respiration	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
+750	—	denitrification (nitrate reduction)	$\text{NO}_3 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow \frac{1}{2}\text{N}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$
+510	—	manganese (IV) reduction	$\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$
+200	—	iron (III) reduction	$\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$
-220	—	sulphate (IV) reduction	$\text{SO}_4^{2-} + 10\text{H}^+ + 8\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$
-240	—	CO_2 reduction to methane (methanogenesis)	$\text{CO}_2 + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
-320			$\text{NAD}^+ + \text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{NADH}$

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

standard reduction potential E'^0 (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
Aerobic	<u>O₂</u>	H ₂ O	<i>Micrococcus luteus</i>
Anaerobic	SO ₄ ²⁻	H ₂ S	<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>
	Fe ³⁺	Fe ²⁺	<i>Geobacter metallireducens</i>
	Mn ⁴⁺	Mn ²⁺	<i>Desulphuromonas acetoxidans</i>
	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	<i>Escherichia coli</i>
	NO ₃ ⁻	N ₂	<i>Thiobacillus denitrificans</i>
	CO ₂	CH ₄	<i>Methanosarcina barkeri</i>
	CO ₂	CH ₃ COO ⁻	<i>Clostridium aceticum</i>
	S ⁰	H ₂ S	<i>Desulphuromonas acetoxidans</i>
	AsO ₄ ²⁻	AsO ₃ ²⁻	<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

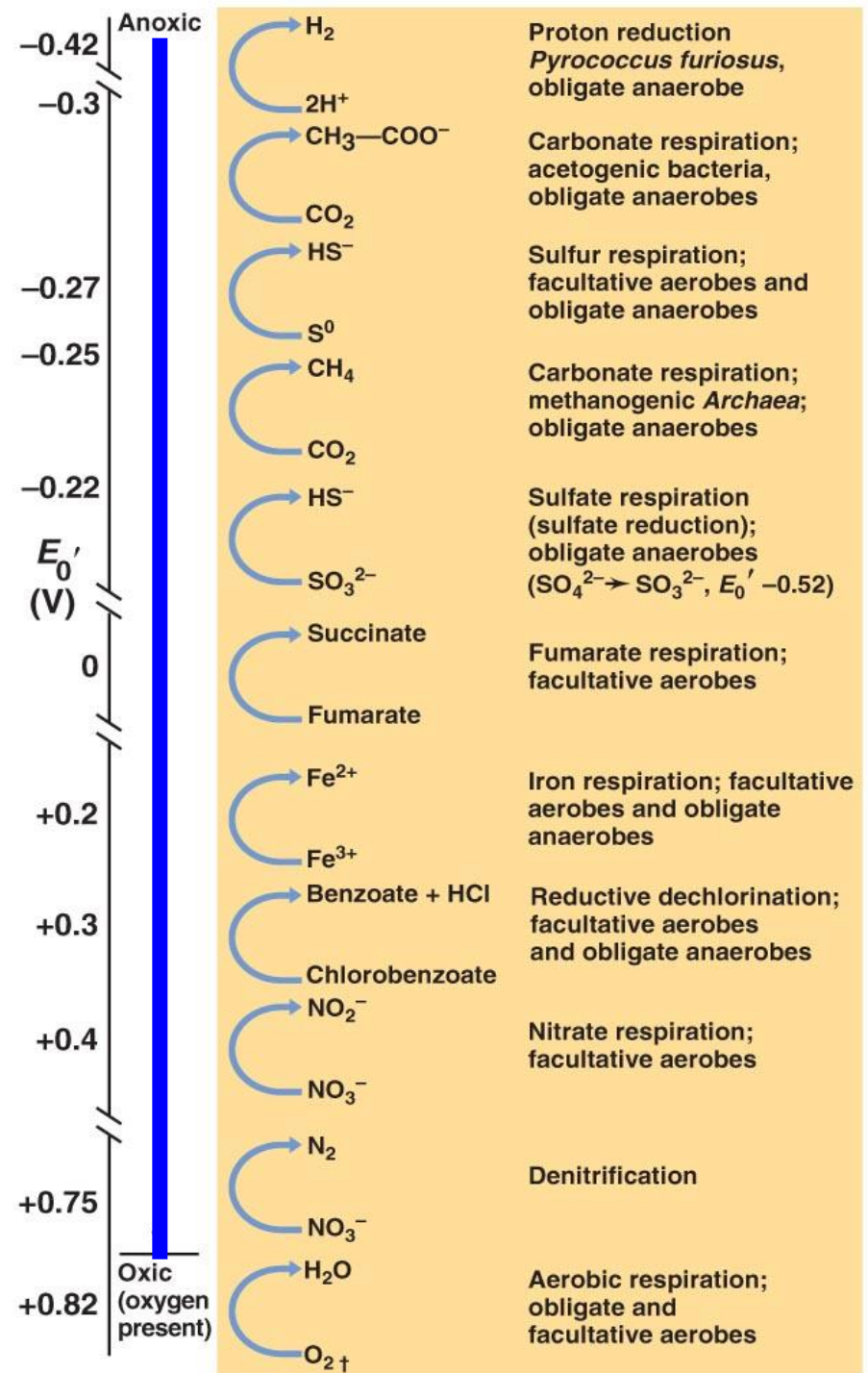
Table 21.4 Oxidation states of key nitrogen compounds

<i>Compound</i>	<i>Oxidation state of N atom</i>
Organic N (—NH_2)	−3
Ammonia (NH_3)	−3
Nitrogen gas (N_2)	0
Nitrous oxide (N_2O)	+1 (average per N)
Nitrogen oxide (NO)	+2
Nitrite (NO_2^-)	+3
Nitrogen dioxide (NO_2)	+4
Nitrate (NO_3^-)	+5

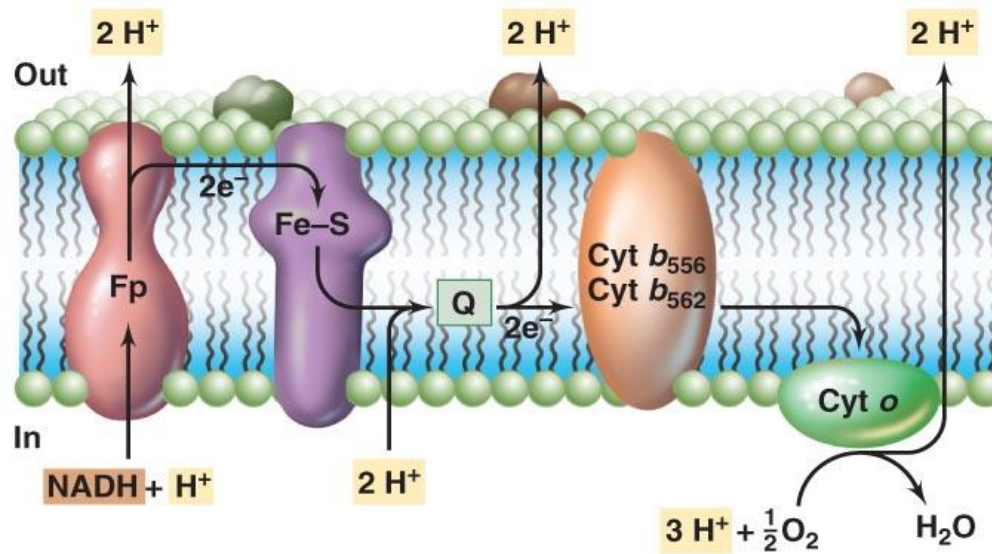
- Τα NO_3^- είναι οι συνήθεις αποδέκτες ηλεκτρονίων**

Κύριοι τύποι Αναεροβικής αναπνοής

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

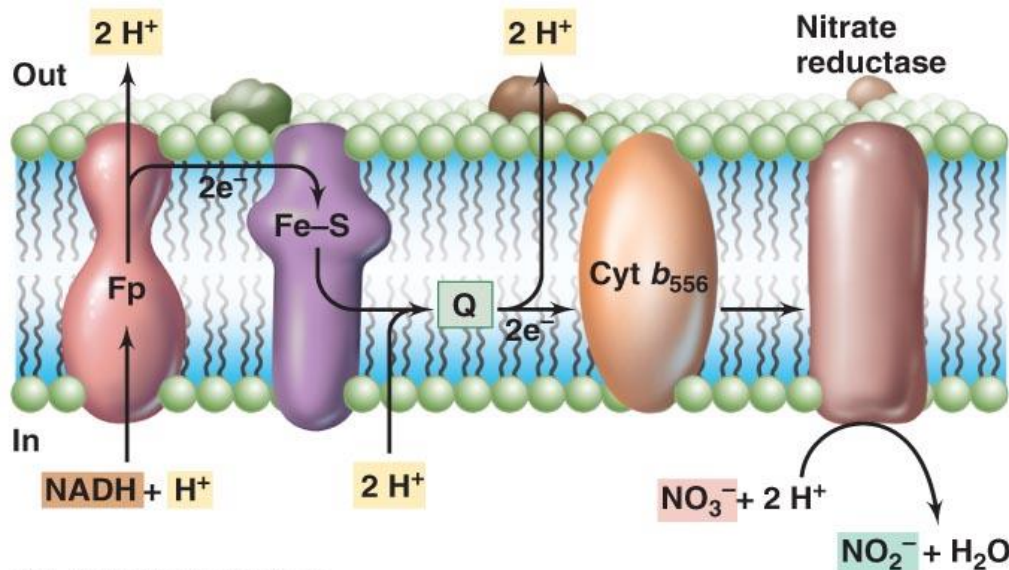


Αεροβική και αναεροβική αναπνοή (*E. coli*)



+O₂

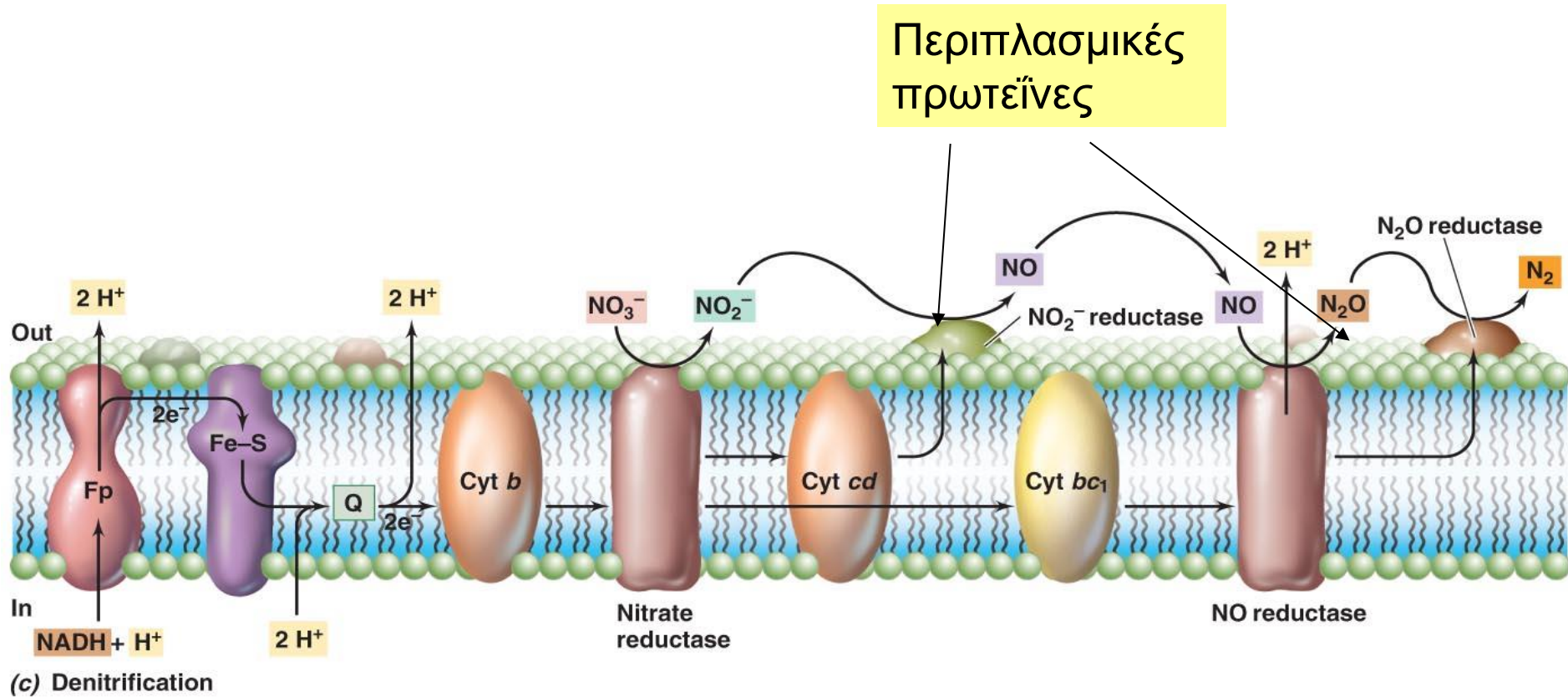
(a) Aerobic respiration



-O₂

(b) Nitrate reduction

Αναεροβική αναπνοή (*Pseudomonas stutzeri*)



$-O_2$

Αναεροβική αναπνοή, συνέχεια...

2.6.3. Αναγωγή θειικών (SO_4^{2-}) και θείου

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

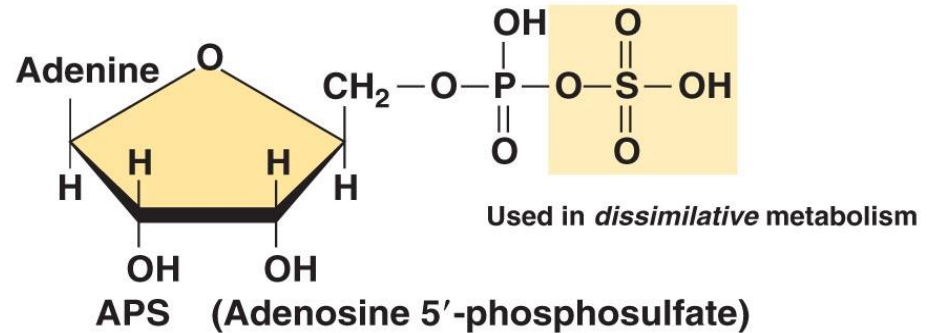
Διαφορετικές ενώσεις μπορούν να δώσουν ηλεκτρόνια για την αναγωγή των θειικών π.χ. H_2 , οργανικές ενώσεις, φωσφορώδη (PO_3^{3-})

Table 21.5 Sulfur compounds and electron donors for sulfate reduction

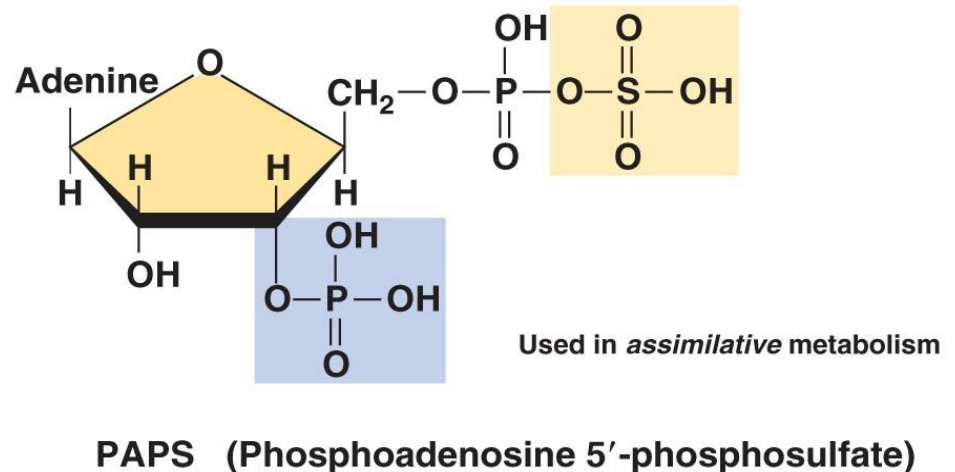
Compound	Oxidation state of S atom
Oxidation states of key sulfur compounds	
Organic S (R-SH)	-2
Sulfide (H_2S)	-2
Elemental sulfur (S^0)	0
Thiosulfate ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$)	+2 (average per S)
Sulfur dioxide (SO_2)	+4
Sulfite (SO_3^{2-})	+4
Sulfate (SO_4^{2-})	+6
Some electron donors used for sulfate reduction	
H_2	Acetate
Lactate	Propionate
Pyruvate	Butyrate
Ethanol and other alcohols	Long-chain fatty acids
Fumarate	Benzoate
Malate	Indole
Choline	Various hydrocarbons

Ενεργοποιημένα θειικά

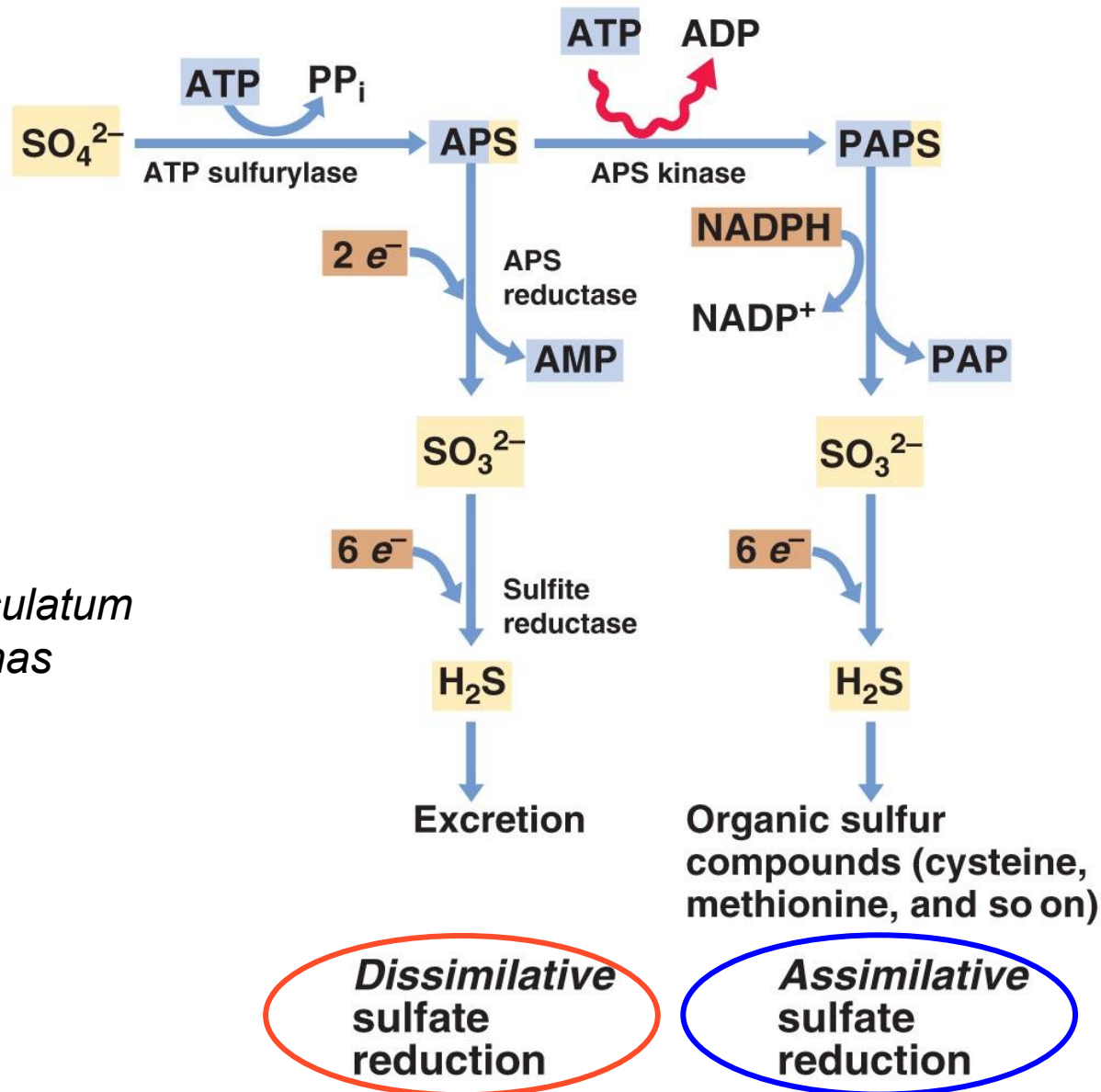
- Η αναγωγή του SO_4^{2-} σε H_2S προχωρά μέσα από διαφορετικά ενδιάμεσα



- Απαιτείται η ενεργοποίηση των θεικών

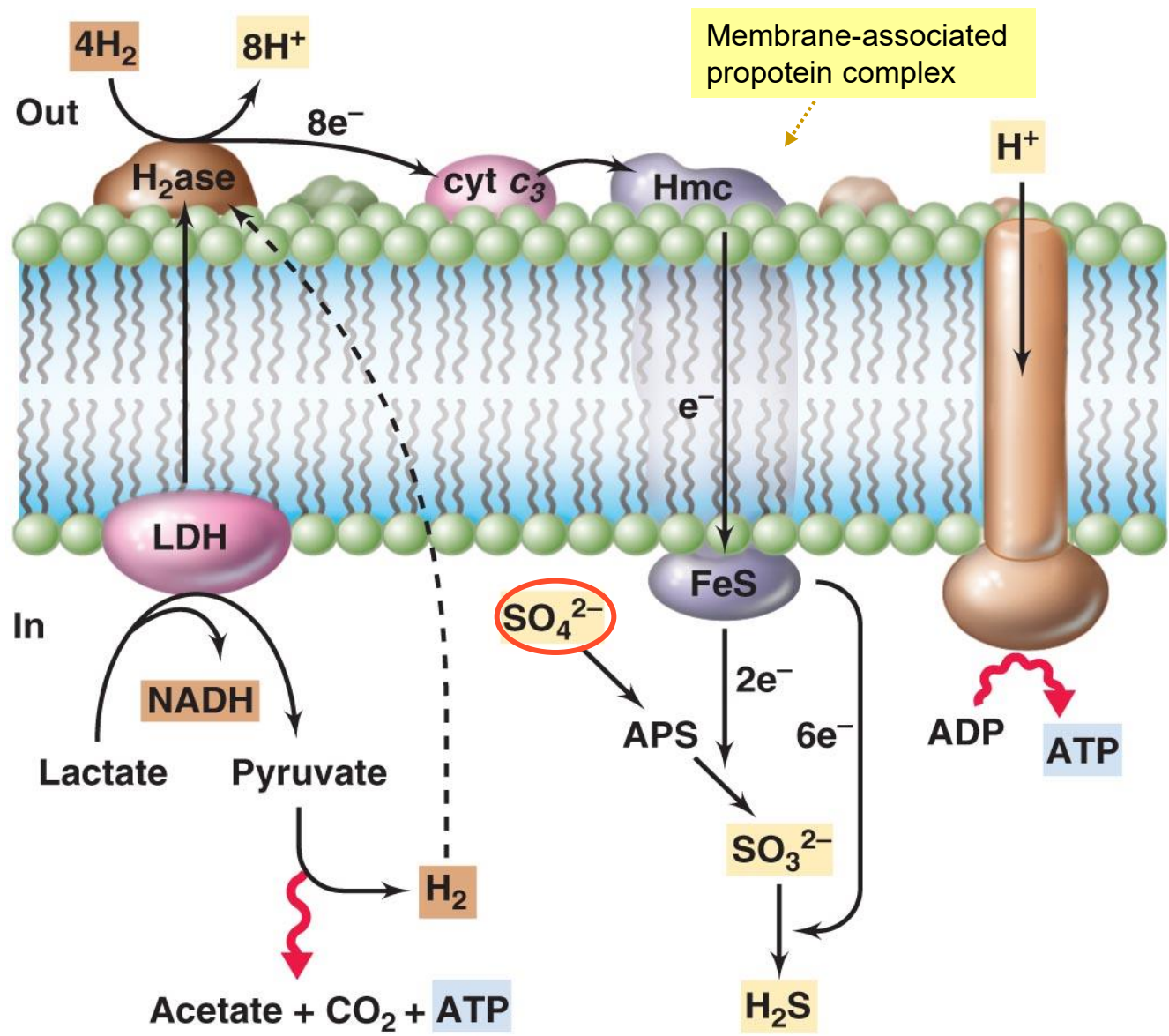


Μη αφομοιωτική και αφομοιωτική αναγωγή θειικών SO_4^{2-}

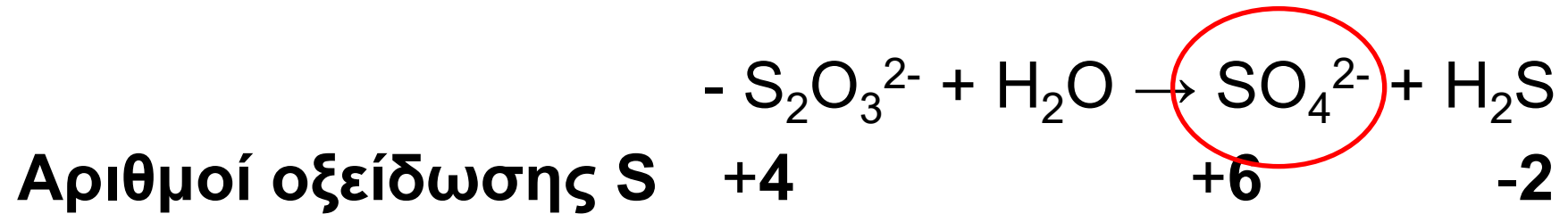


Desulfovibrio
Desulfotomaculatum
Desulfuromonas

Αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων κατά την αναγωγή των SO_4^{2-}



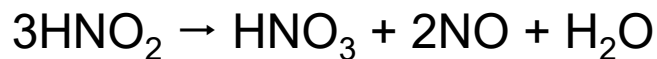
- Μερικά βακτήρια που ανάγουν το θείο μπορούν να κερδίσουν επιπλέον ενέργεια από την αυτοοξειδοαναγωγή ενώσεων θείου (π.χ. θειοθειϊκών)



APS



Εδώ είναι οι περιπτώσεις των νιτρωδών, υπεροξειδίου:



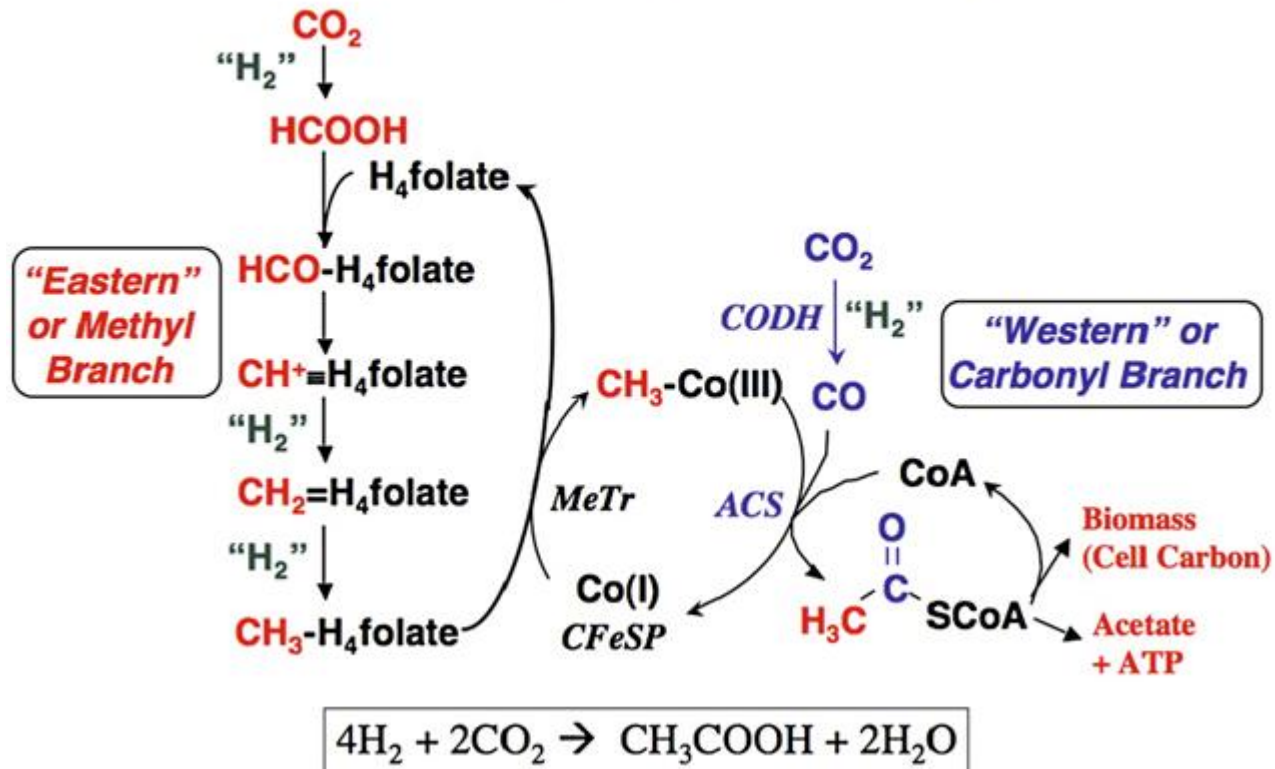
2.6.4 Οξικογένεση

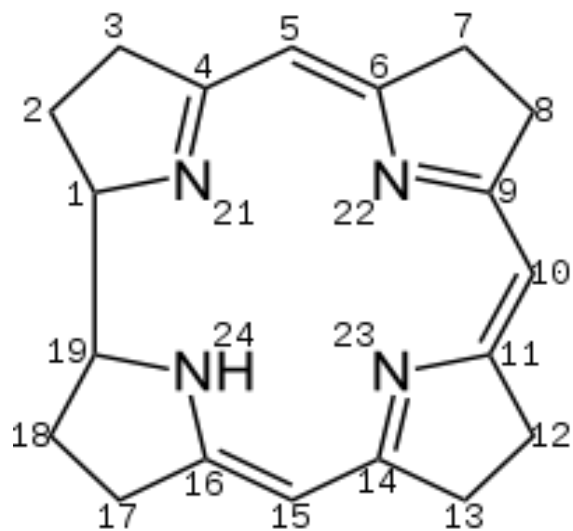
Οξικογένεση, γενικά χαρακτηριστικά

- Αναγωγή του (+4) CO_2 σε (+3) **οξικό** μέσω της μεταβολικής οδού του **ακέτυλο συνενζύμου Α**.
- Δότης ηλεκτρονίων: H_2 (κύριος).
- Αποδέκτης ηλεκτρονίων: CO_2 .
- Βαθμιδωτή επιμήκυνση της ανθρακικής αλυσίδας ξεκινώντας από τον άνθρακα του CO_2 .
- Προϊόντα, οξικό (για βιοσύνθεση) και ATP.

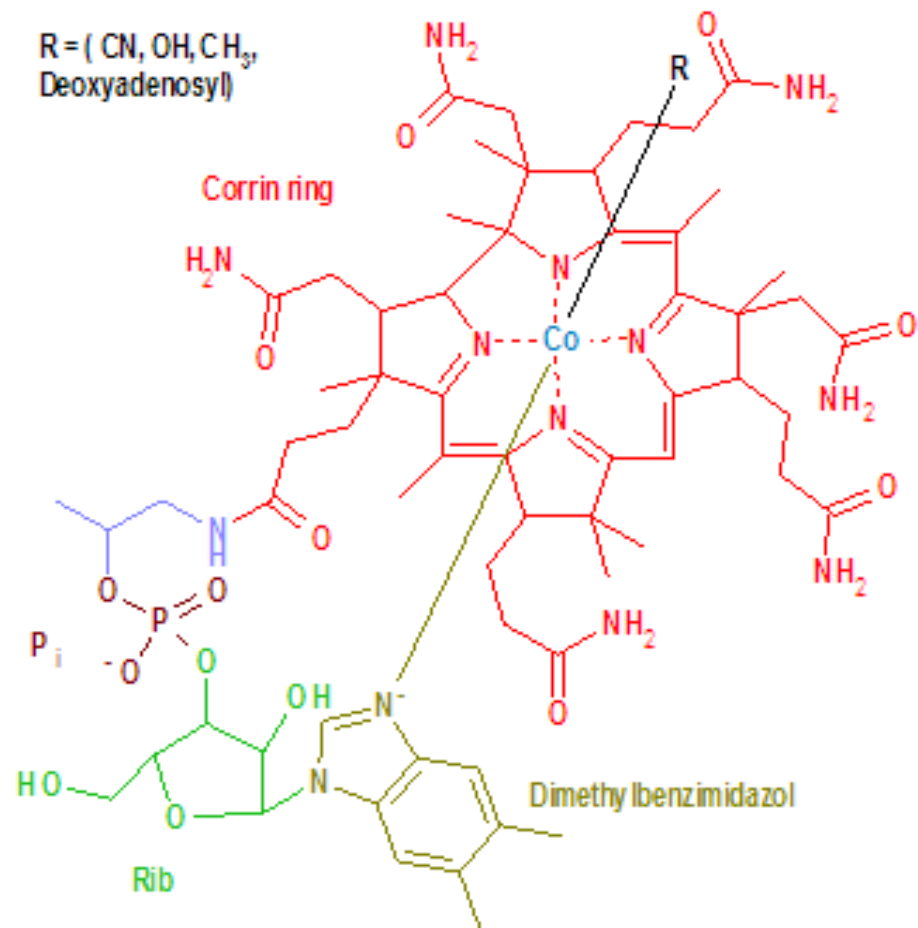
Αυτός ο δρόμος είναι ευρέως διαδεδομένος στα **υποχρεωτικά αναερόβια βακτήρια**.

The Wood-Ljungdahl Pathway



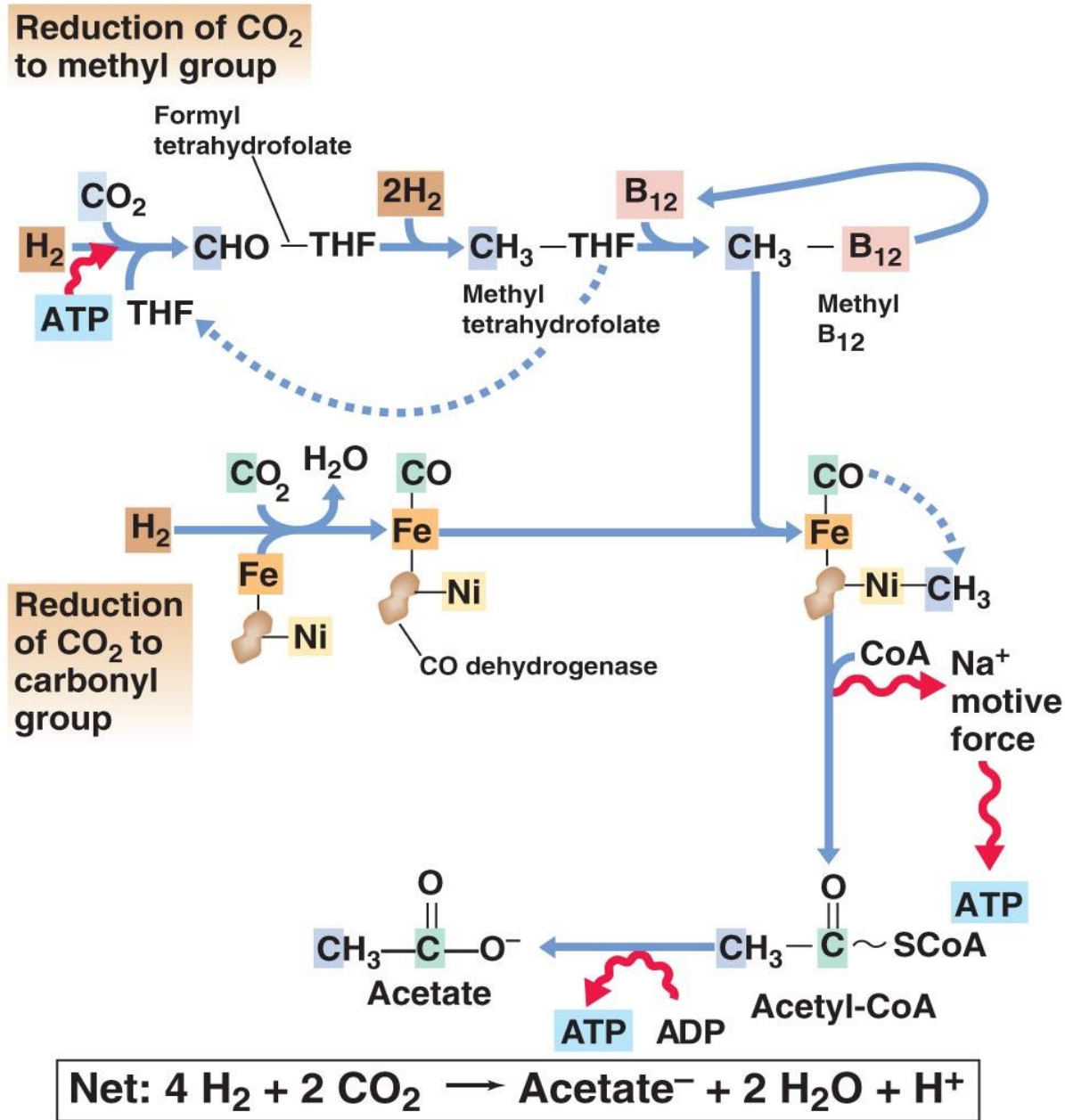


Δακτύλιος
κορρίνης



Βιταμίνη B12
(κυανοκοβαλαμίνη)

Αντιδράσεις ακέτυλο-CoA μεταβολικής οδού



Αναστροφή της οξικογένεσης

Ορισμένα αναερόβια βακτήρια χρησιμοποιούν την οδό Wood-Ljungdahl αντίστροφα για να διασπάσουν το οξικό οξύ. Για παράδειγμα, τα βακτήρια που ανάγουν τα θειικά άλατα μετατρέπουν πλήρως το οξικό οξύ σε CO_2 και H_2 σε συνδυασμό με την αναγωγή του θειικού άλατος σε σουλφίδιο.

<https://link.springer.com/article/10.1007/BF00408310>

Οργανισμοί που χρησιμοποιούν την οδό του ακέτυλο-CoA

Table 21.6 Organisms employing the acetyl-CoA pathway of CO₂ 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 CO₂ fixation

II. Acetate synthesis in autotrophic metabolism

Autotrophic homoacetogenic bacteria

Autotrophic methanogens

Autotrophic sulfate-reducing bacteria

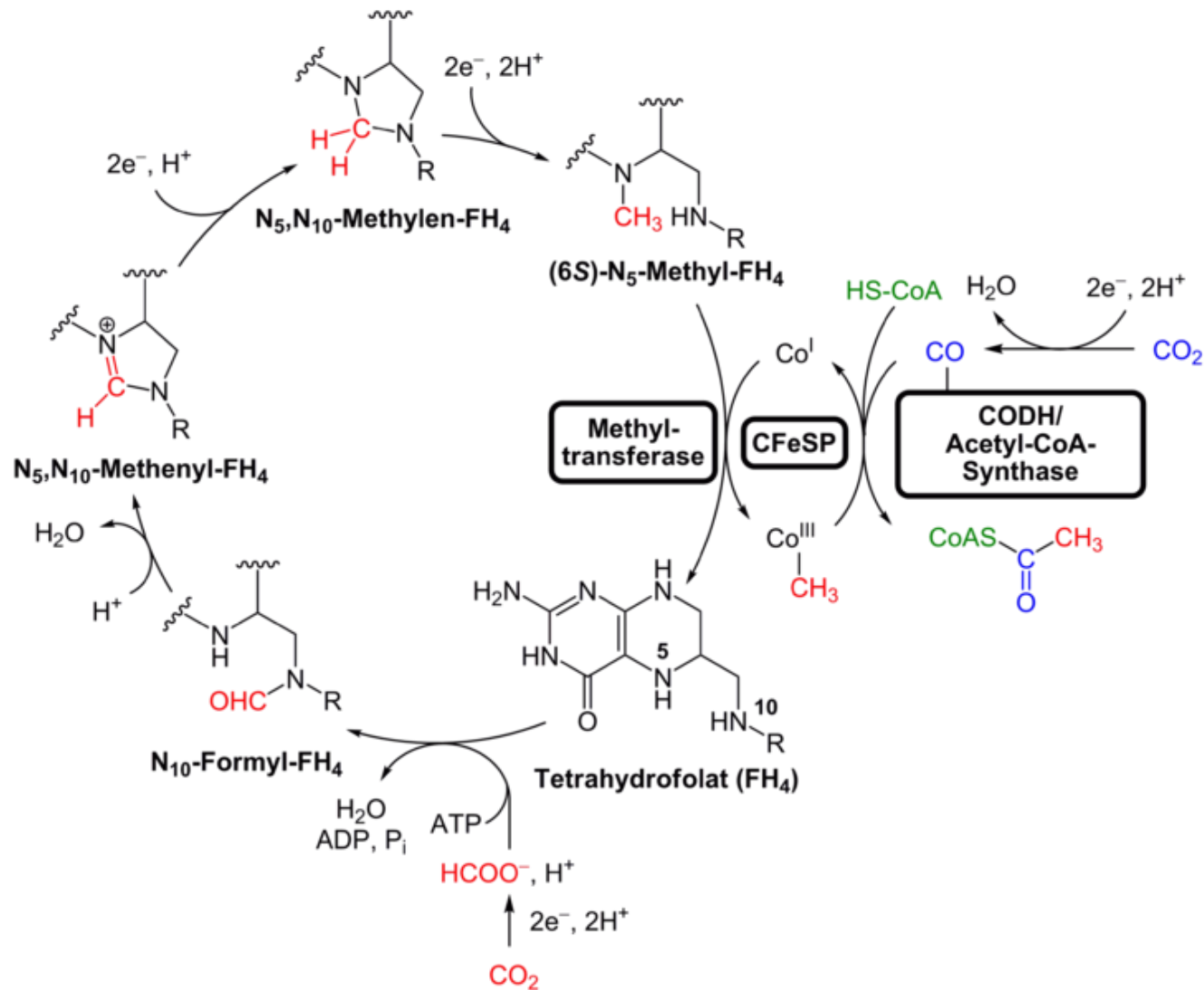
III. Acetate oxidation in energy metabolism

Reaction: $\text{Acetate} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{CO}_2 + 8 \text{H}$

Group II sulfate reducers (other than *Desulfobacter*)

Reaction: $\text{Acetate} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CH}_4$

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://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 (CH_4)

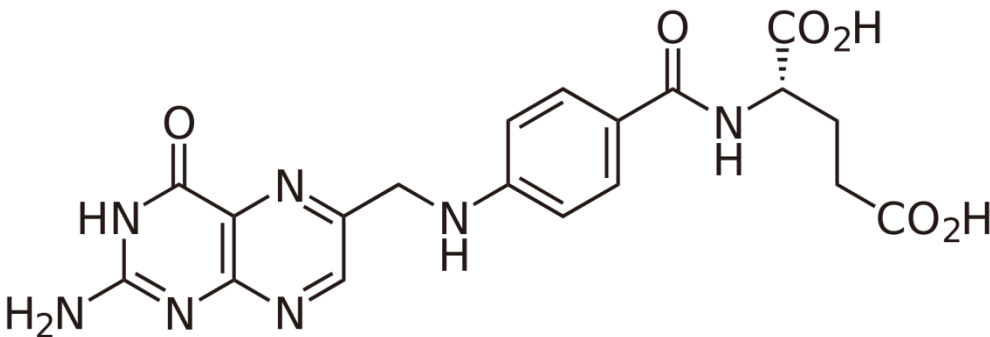
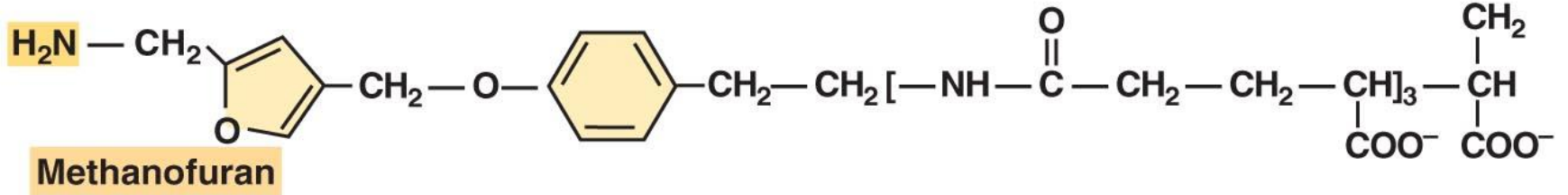
Μεθανογένεση, γενικά χαρακτηριστικά

- Δότες ηλεκτρονίων στη μεθανογένεση: H_2 (κύριος δότης), φορμικό οξύ, 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 F_{420} (F_{420})
 - Συνένζυμο F_{430} (F_{430})
 - Συνένζυμο B (CoB) **S-C**
- **Τελικό ένζυμο:** μέθυλο αναγωγή

Μεθανοφουράνιο



φυλλικό οξύ

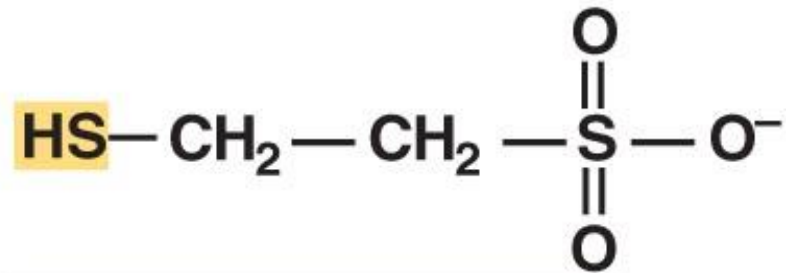


Μεθανοπτερίνη

Μοιάζει στο φυλλικό οξύ

Ανάλογη λειτουργία με το THF

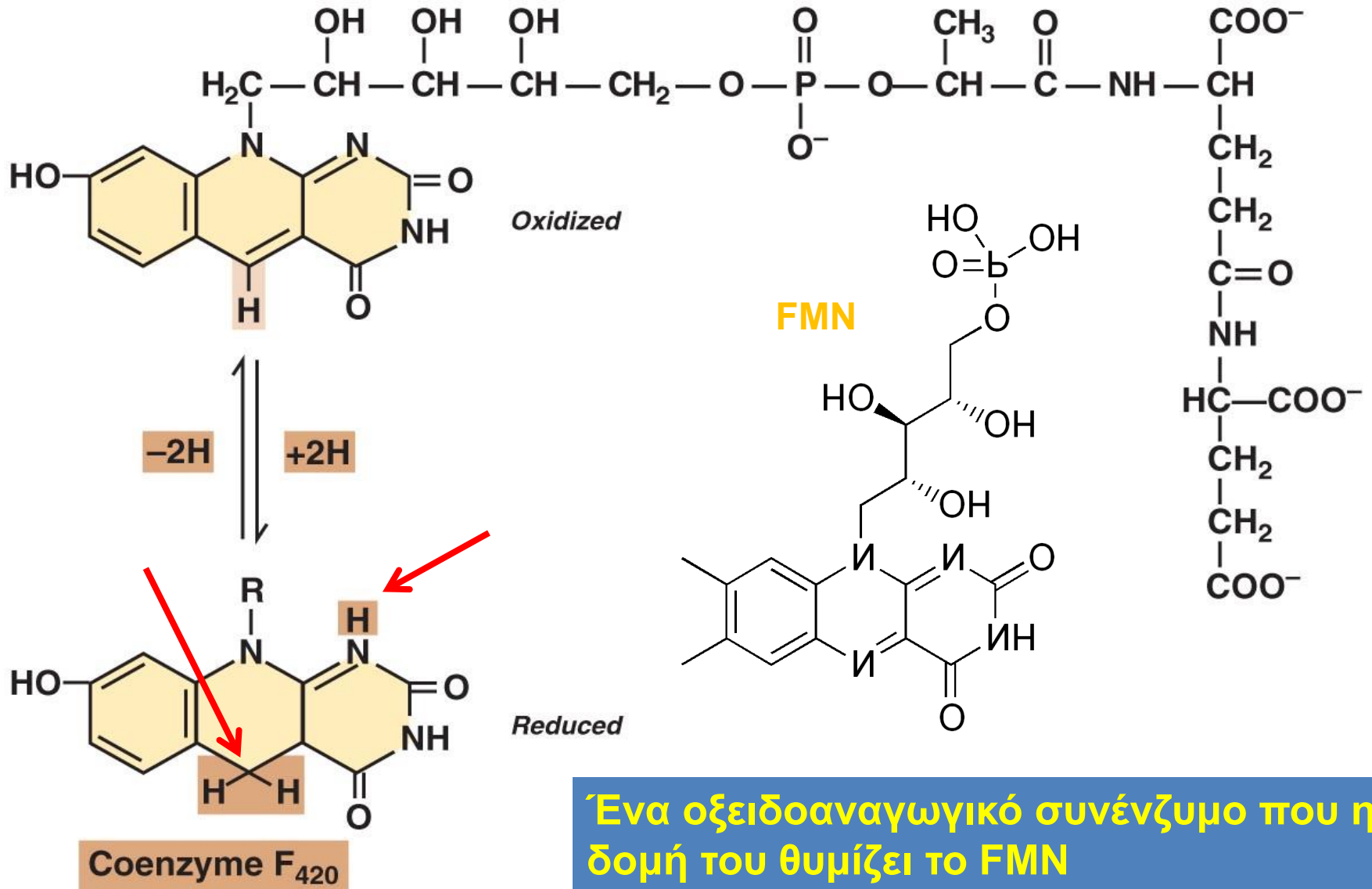
Συνένζυμο M



Coenzyme M (CoM)

Απαιτείται για το τελικό στάδιο της
μεθανογένεσης

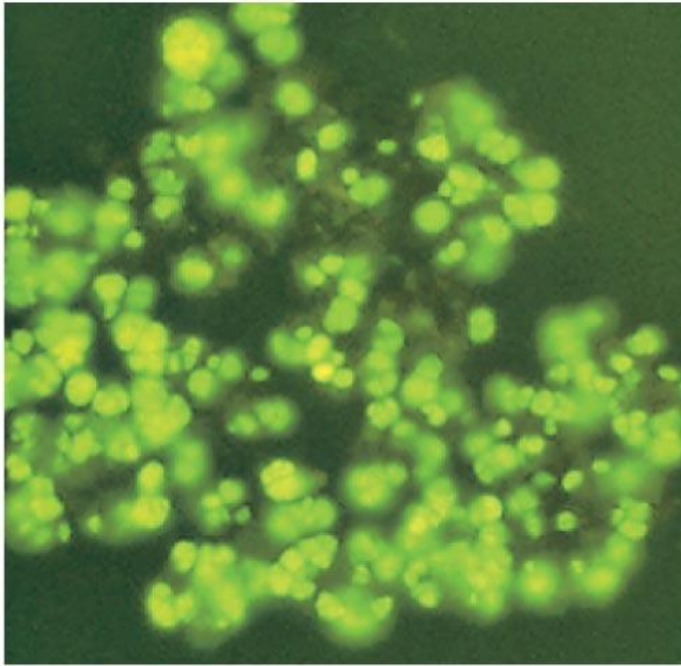
Συνένζυμο F₄₂₀



Ένα οξειδοαναγωγικό συνένζυμο που η δομή του θυμίζει το FMN

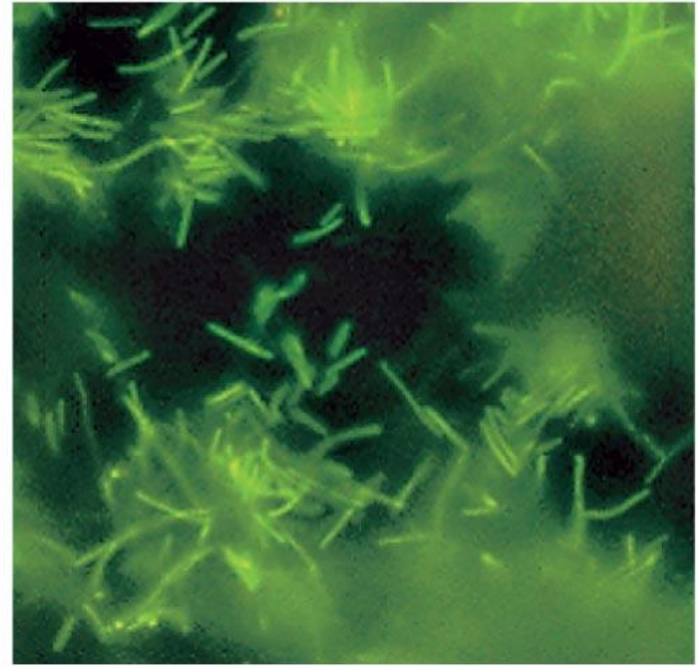
Η οξειδωμένη μορφή απορροφεί στα 420 nm και φθορίζει στο γαλαζοπράσινο

- Ο φθορισμός του **συνενζύμου F_{420}** μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μικροσκοπική αναγνώριση των μεθανογόνων βακτηρίων



T. D. Brock

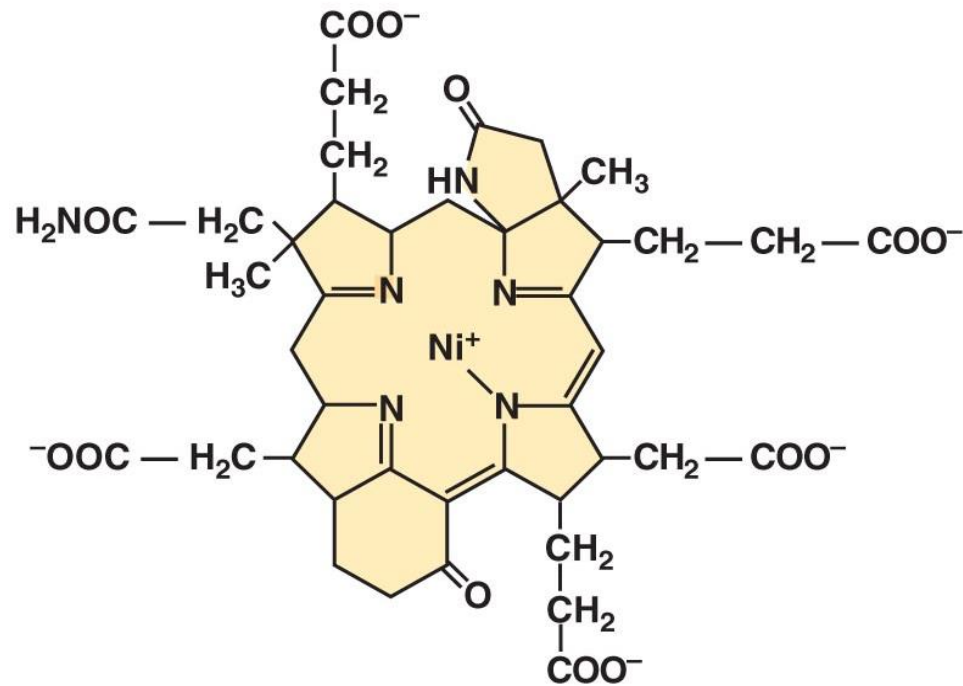
Φθορισμός του **συνενζύμου F_{420}** του μεθανογόνου *Methanosarcina barkeri*



T. D. Brock

Φθορισμός του **συνενζύμου F_{420}** του μεθανογόνου *Methanobacterium formicicum*

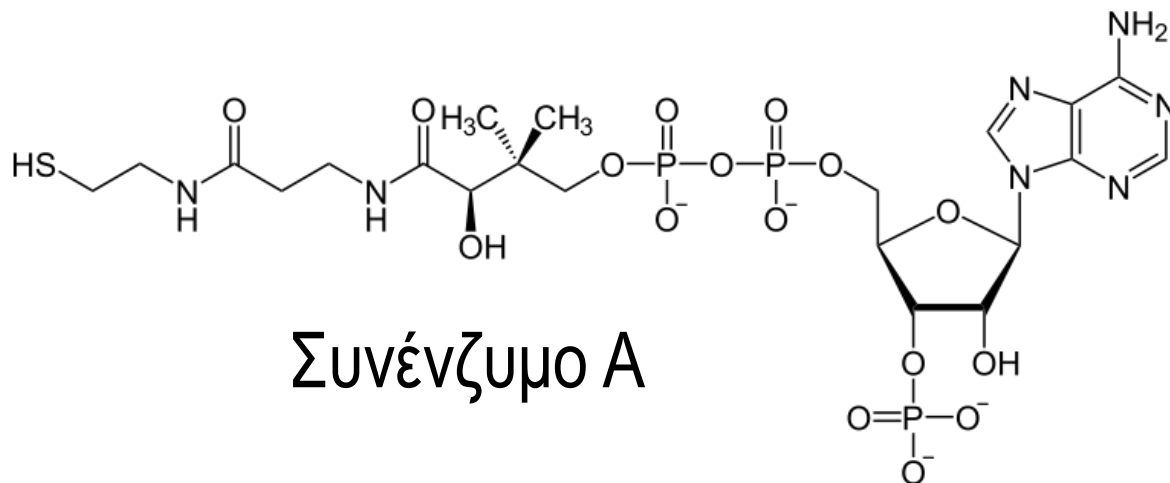
Συνένζυμο F₄₃₀



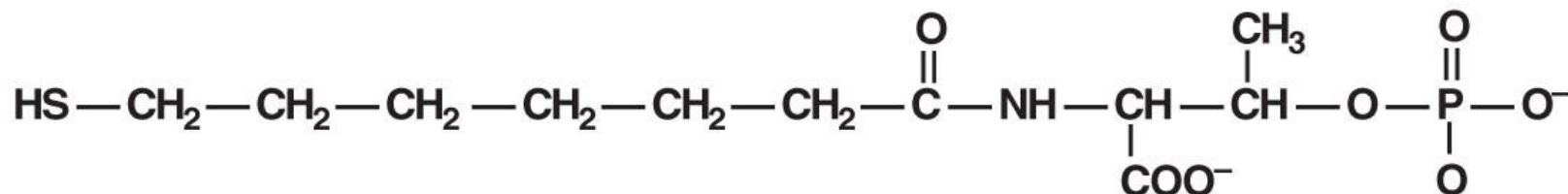
Coenzyme F₄₃₀

Περιέχει νικέλιο και απαιτείται για το τελικό στάδιο της μεθανογένεσης

Συνένζυμο B



Συνένζυμο A



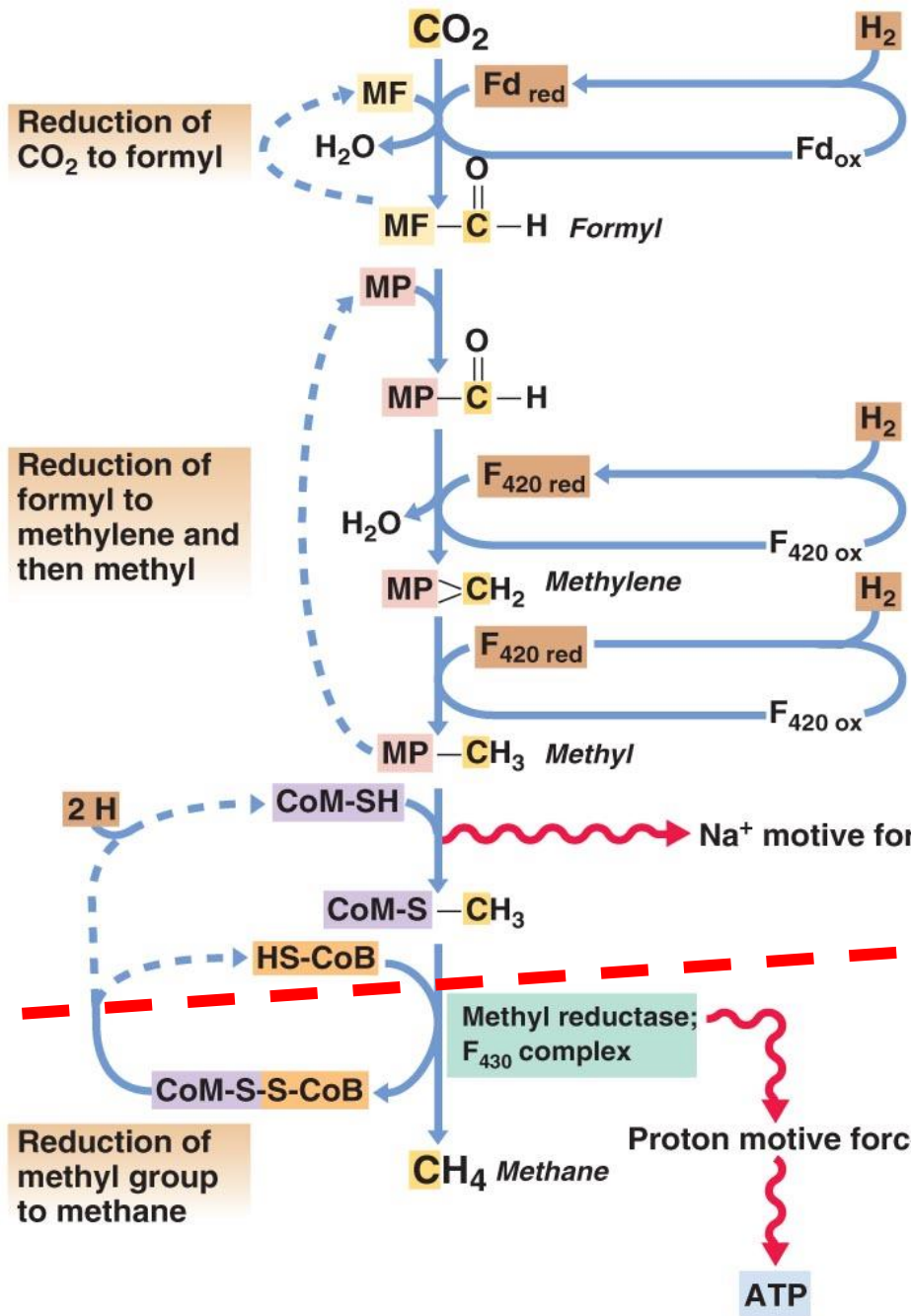
Coenzyme B (CoB)

7-Μερκαπτο επτανοϋλ θρεόνινο φωσφορικό

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

Μεθανογένεση

από CO₂ και H₂



Μεθανοφουράνιο (MF)

Μεθανοπτερίνη (MP)

Συνένζυμο F₄₂₀ (F₄₂₀)

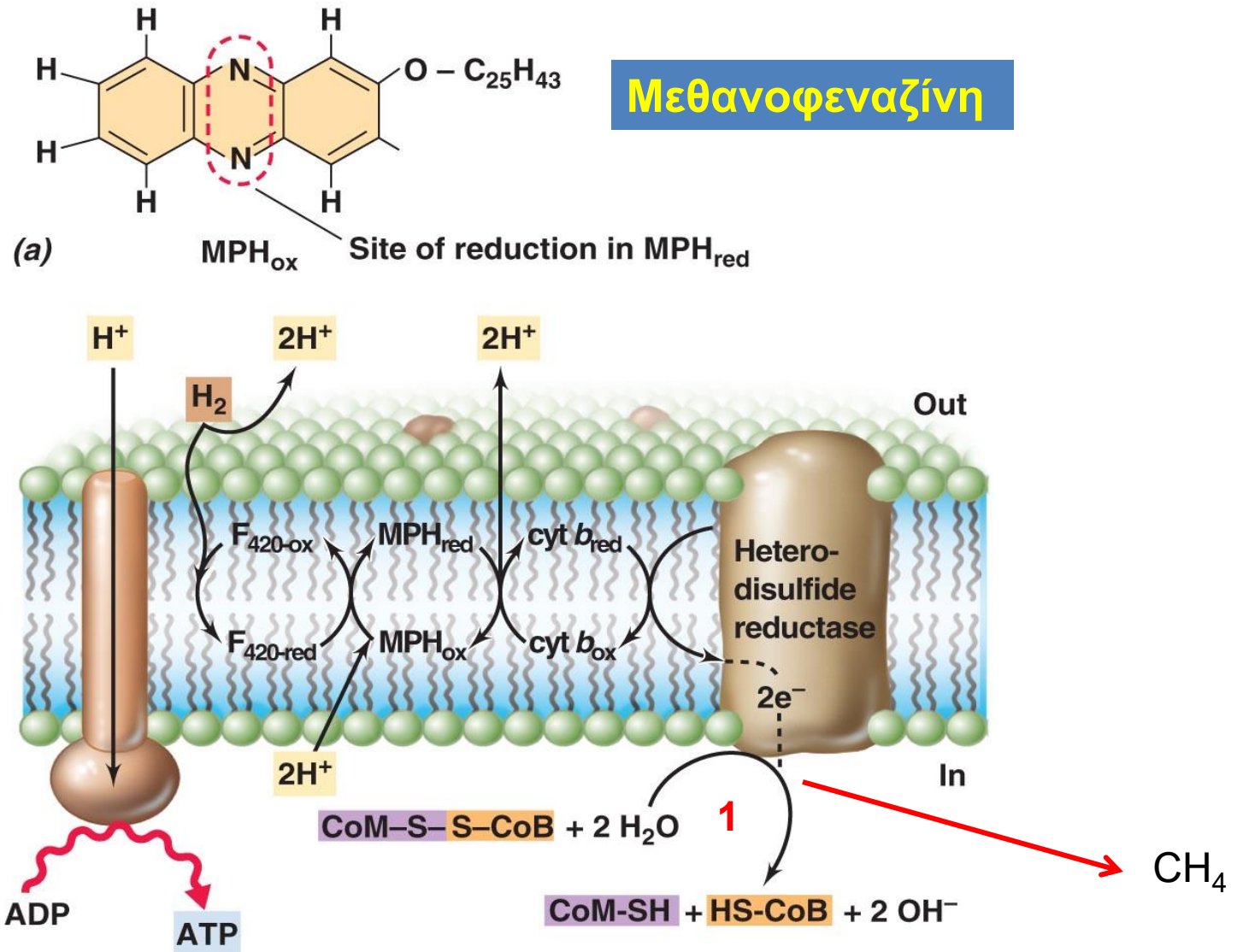
Συνένζυμο M (CoM)

Συνένζυμο B₁ (CoB)

Συνένζυμο F₄₃₀ (F₄₃₀)

διάγραμμα →

Μεθανογένεση και αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων



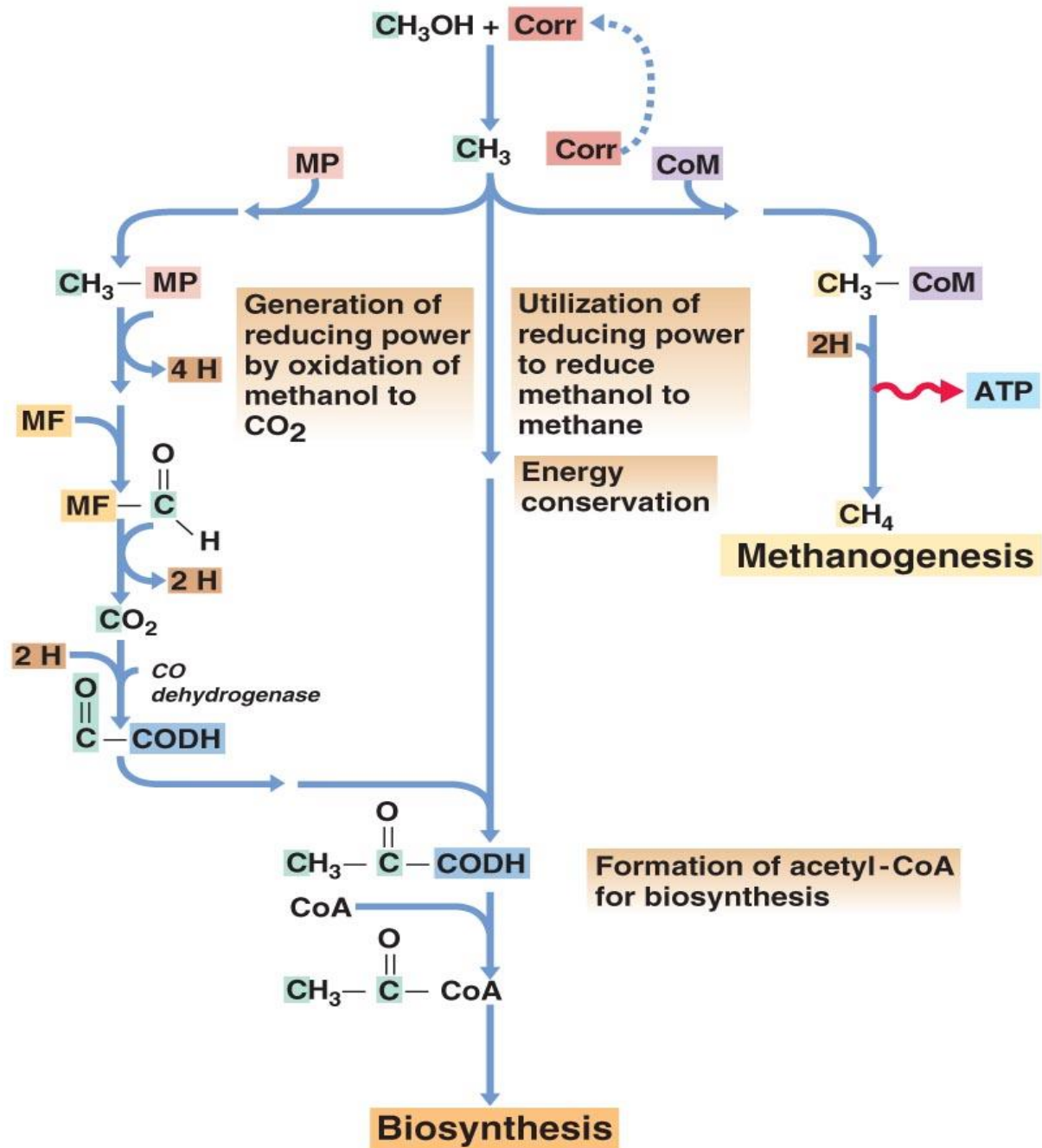
Μεθανογένεση από Μεθανόλη

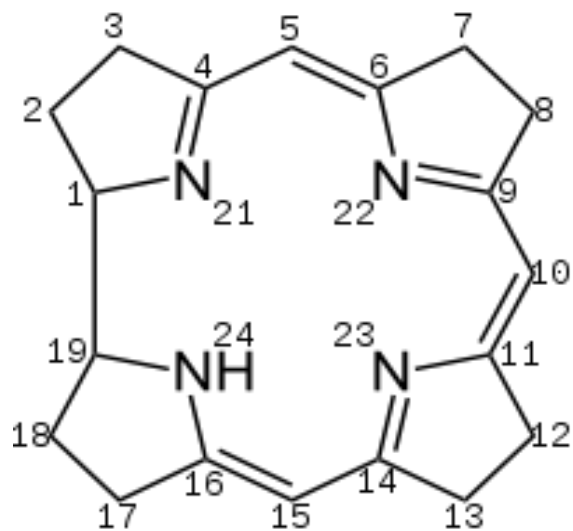
Δακτύλιος κορρίνης (Corr)

Μεθανοπερίνη (MP)

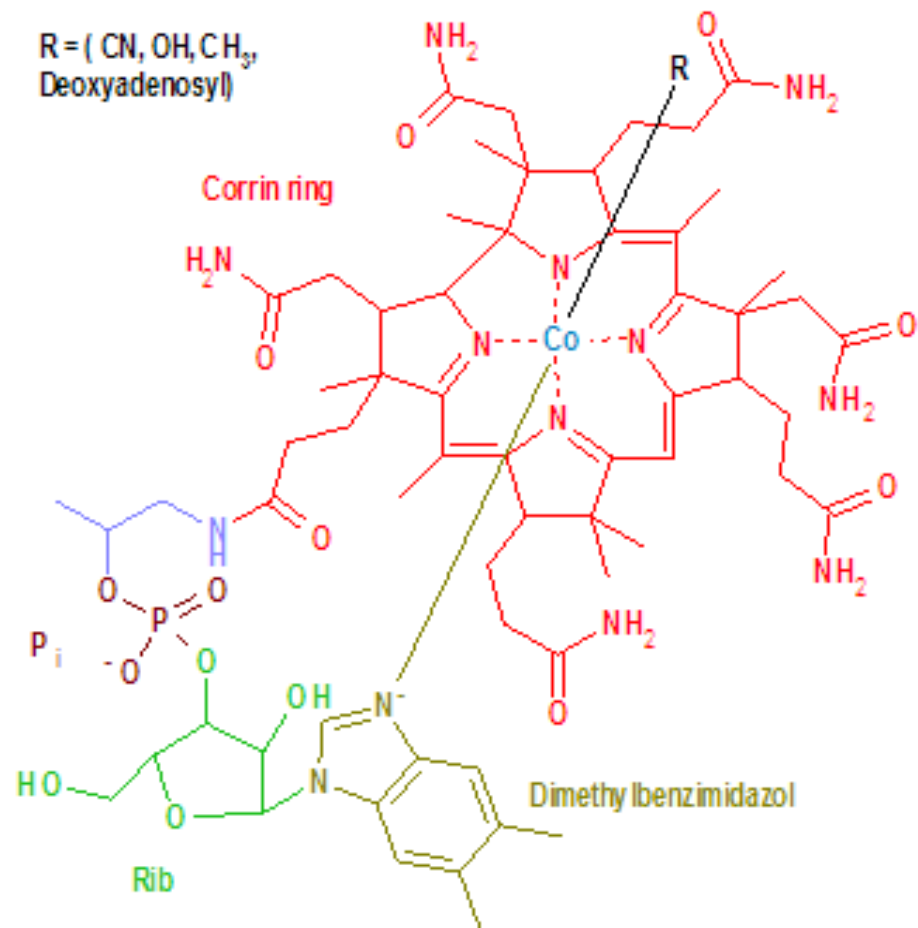
Συνένζυμο M (CoM)

Μεθανοφουράνιο (MF)



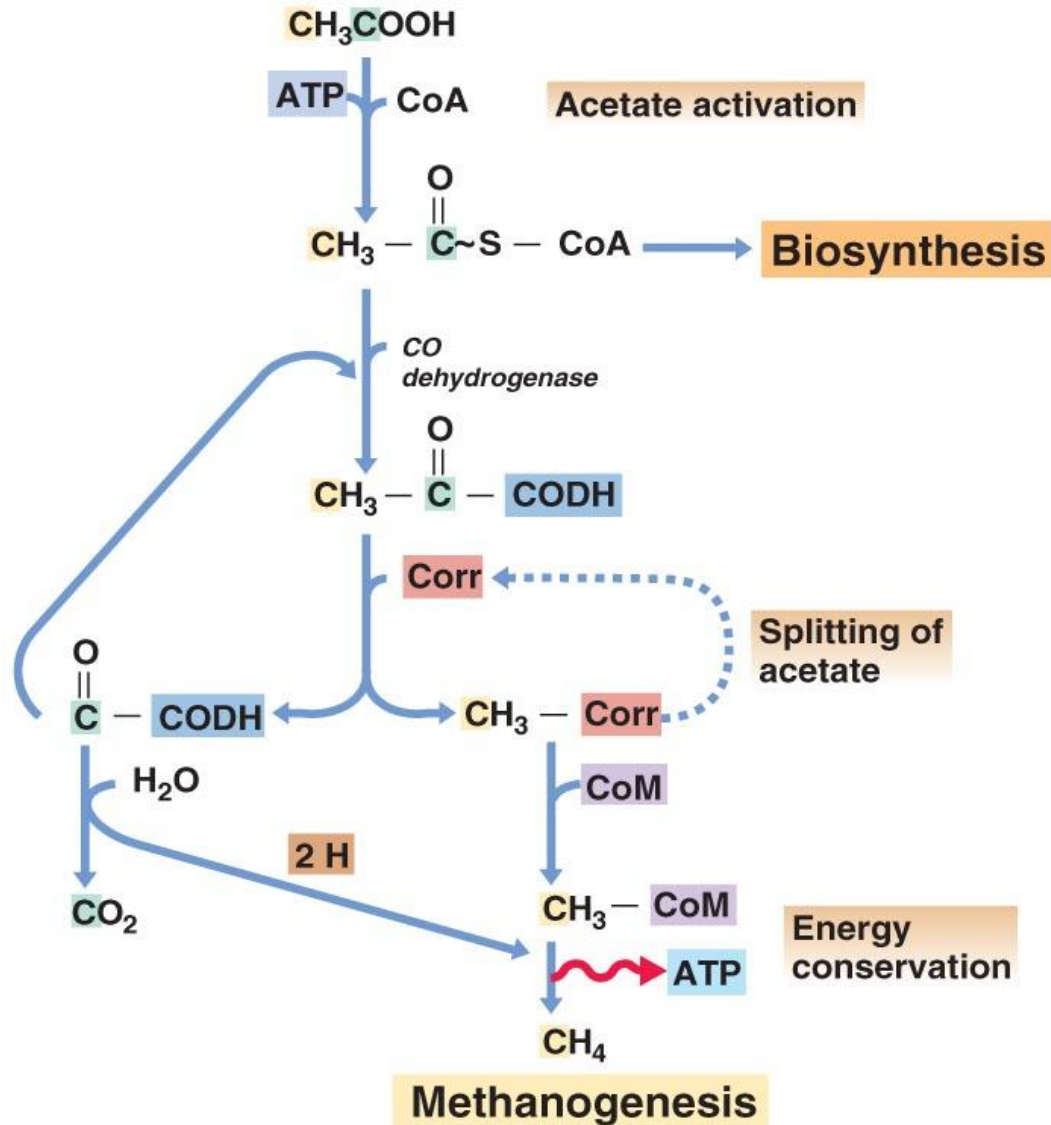


Δακτύλιος
κορρίνης



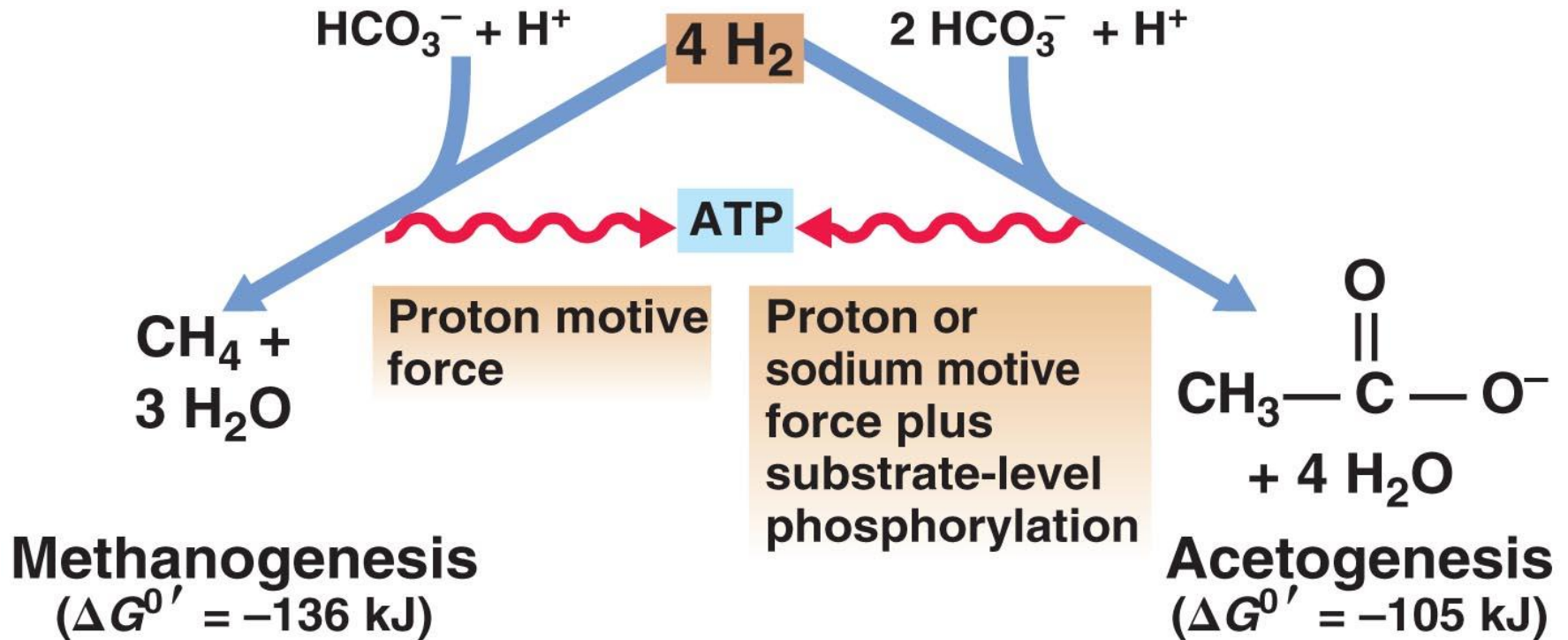
Βιταμίνη B12 (κυανοκοβαλαμίνη)

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

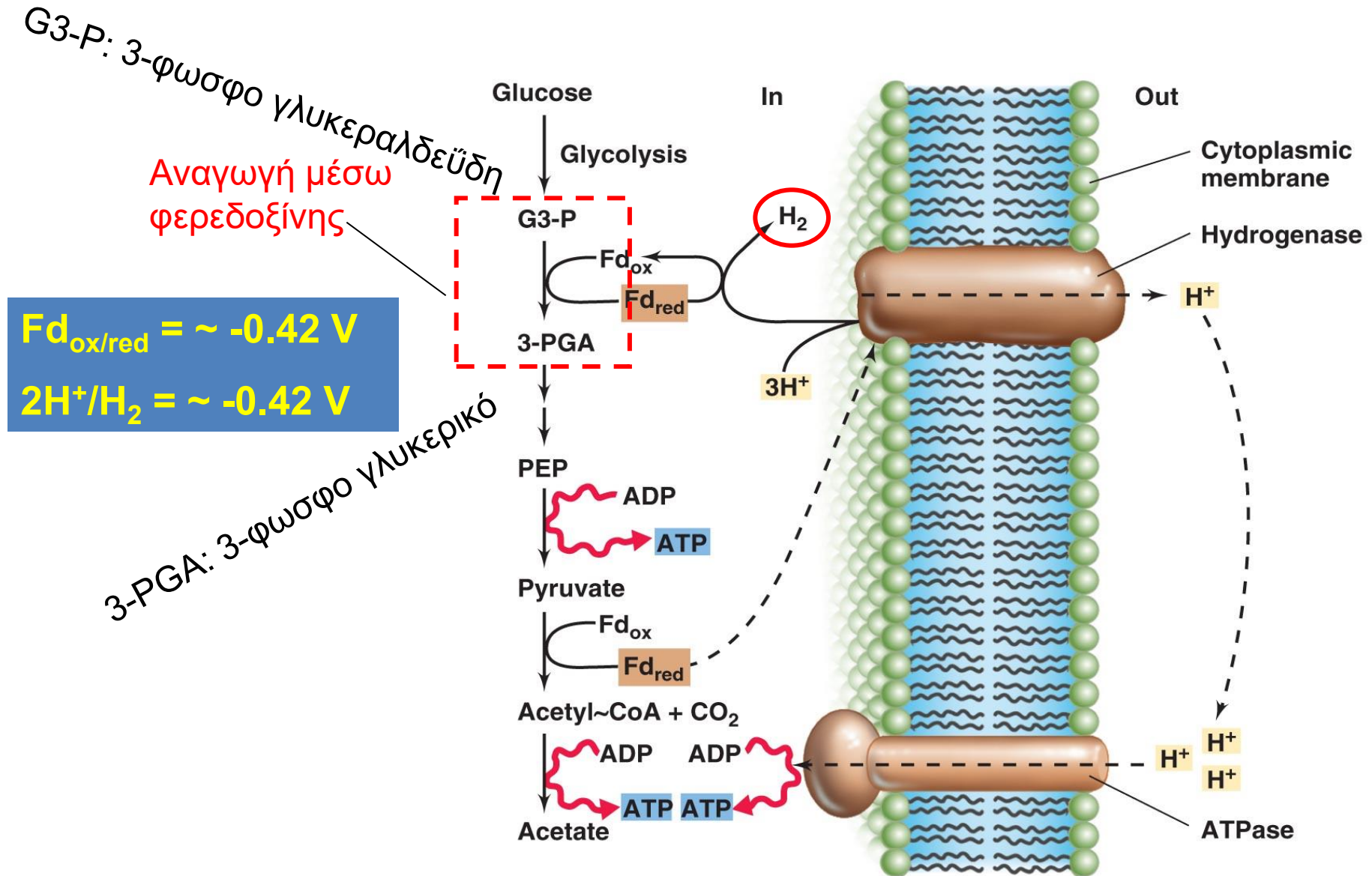
Μεθανογένεση και Οξικογένεση



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^+ στον *P. furiosus*



2.6.7. Άλλοι αποδέκτες ηλεκτρονίων

- Τα Fe^{3+} , Mn^{4+} , ClO_3^- , και διάφορες οργανικές ενώσεις μπορούν να δράσουν ως αποδέκτες ηλεκτρονίων στα βακτήρια.
- Το Fe^{3+} είναι άφθονο στη φύση και η αναεροβική αναγωγή του χρησιμοποιείται από πολλούς οργανισμούς για παραγωγή ενέργειας.

Άλλοι αποδέκτες ηλεκτρονίων

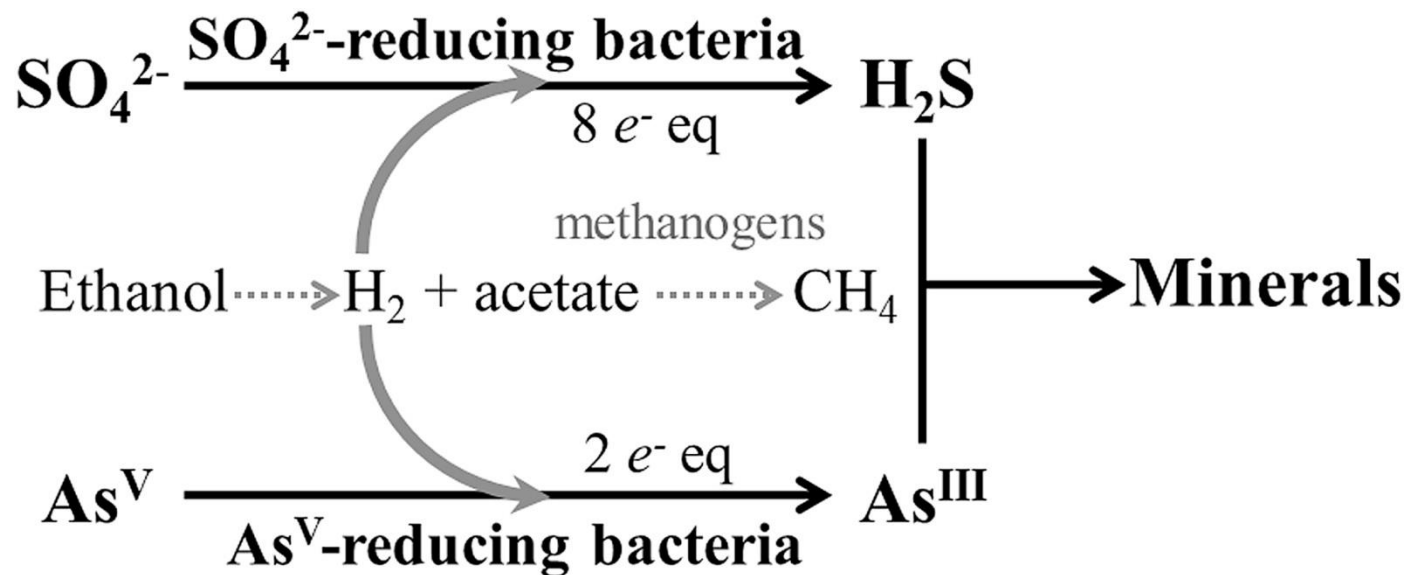
$$\Delta G = -nF\Delta E$$

Couple	Reaction	E_0'
Fumarate/ Succinate	$\begin{array}{c} \text{O} \quad \text{H} \quad \text{O} \quad \text{O} \\ \parallel \quad \quad \parallel \quad \parallel \\ -\text{O}-\text{C}-\text{C}=\text{C}-\text{C}-\text{O}^- \\ \quad \quad \\ \quad \quad \text{H} \end{array} \xrightarrow{2\text{H}} \begin{array}{c} \text{O} \quad \text{O} \\ \parallel \quad \parallel \\ -\text{O}-\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{C}-\text{O}^- \end{array}$	+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
Arsenate/ Arsenite	$\begin{array}{c} \text{O}^- \\ \\ -\text{O}-\text{As}=\text{O} \\ \\ \text{O}^- \end{array} \xrightarrow{2\text{H}} \begin{array}{c} \text{O}^- \\ \\ \text{As}-\text{O}^- \\ \\ \text{O}^- \end{array} + \text{H}_2\text{O}$	+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	$\begin{array}{c} \text{O} \quad \text{O} \\ \parallel \quad \parallel \\ -\text{O}-\text{Se}-\text{O}^- \\ \parallel \quad \parallel \\ \text{O} \quad \text{O} \end{array} \xrightarrow{2\text{H}} \begin{array}{c} \text{O}^- \\ \\ \text{Se}=\text{O} \\ \\ \text{O}^- \end{array} + \text{H}_2\text{O}$	+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

2.6.8. Συνδυαστική οξείδωση και αναγωγή από βιοκοινότητες

2.6.8.1 Βιοορυκτοποίηση κατά την αναγωγή των AsO_4^{3-} , As^{V} από βιοκοινότητες



2.6.8.1 Βιοορυκτοποίηση κατά την αναγωγή των AsO_4^{3-} , $\text{As}^{[\text{V}]}$ από βιοκοινότητες

- Η ιδιότητα των βακτηρίων να ανάγουν τα θειικά (SO_4^{2-}), έχει χρησιμοποιηθεί για τον καθαρισμό των αρσενικών (AsO_4^{3-} , $\text{As}^{[\text{V}]}$) από τοξικά κατάλοιπα και μολυσμένο νερό.
 - Παραγωγή As_2S_3 (τρисуλφίδιο του As, αδιάλυτο) κατά την αναγωγή των $\text{As}^{[\text{V}]}$ σε $\text{As}^{[\text{III}]}$ ταυτόχρονα με την αναγωγή θειικών (SO_4^{2-}).



Dianne K. Newman and Stephen Tay

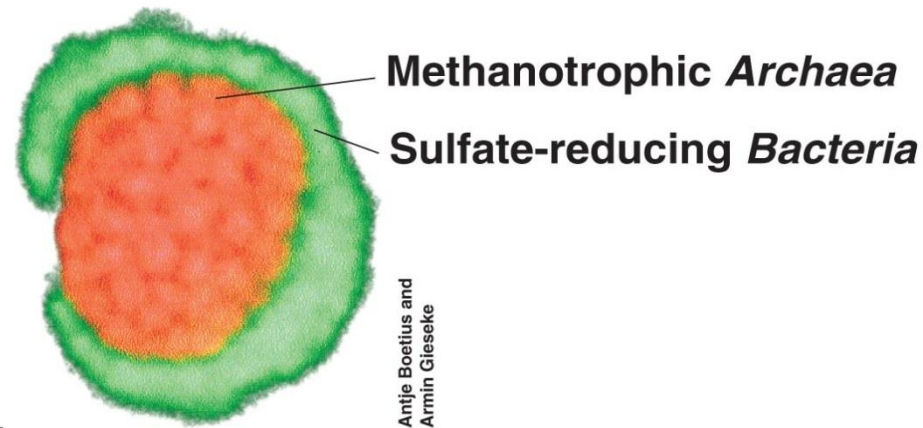
Μετά τον
εμβολιασμό

Συνθετικό
 As_2S_3

Βιοορυκτοποίηση μετά
από 2 εβδομάδες

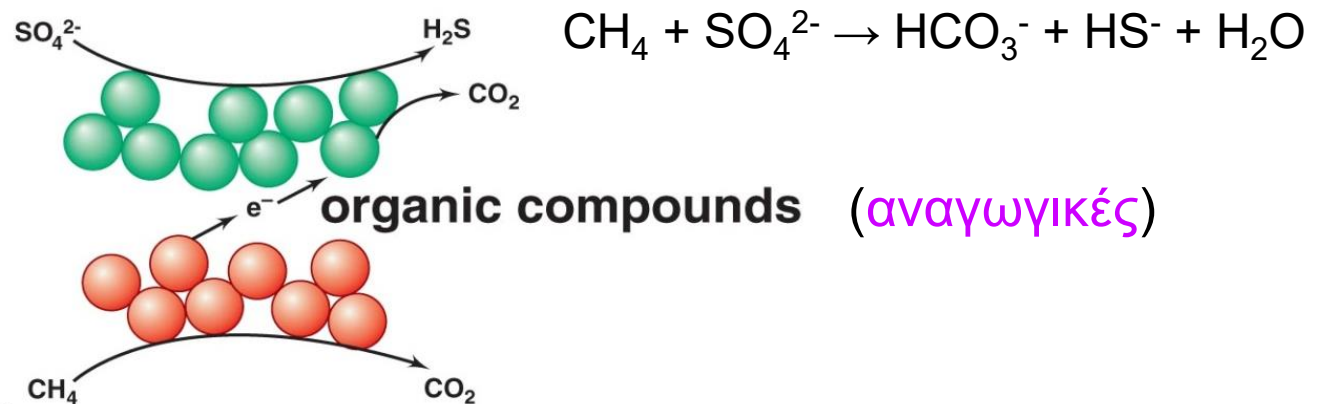
2.6.8.2 Ανοξική οξείδωση του μεθανίου σε CO₂ από **βιοκοινότητες**

- Μεθάνιο (CH₄)
 - Ο απλούστερος υδρογονάνθρακας
 - Μπορεί να οξειδωθεί υπό αναερόβιες συνθήκες από κοινοπραξίες *μεθανοτροπικών αρχαίων και βακτηρίων που ανάγουν τα θειικά*
 - Τα αρχαία οξειδώνουν το CH₄ σε CO₂ **ενώ παράλληλα παράγουν μία αναγωγική οργανική ένωση**
 - Τα βακτήρια που ανάγουν τα θειικά (SO₄²⁻) χρησιμοποιούν αυτή την οργανική ένωση για να πάρουν ηλεκτρόνια ώστε να ανάγουν το SO₄²⁻ σε H₂S. Η αντίδραση αναγωγής στα αρχαία προχωράει και από την διαρροή ηλεκτρονίων στην αναγωγή των θειικών.
 - Η συνολική αντίδραση: $\text{CH}_4 + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{HS}^- + \text{H}_2\text{O}$



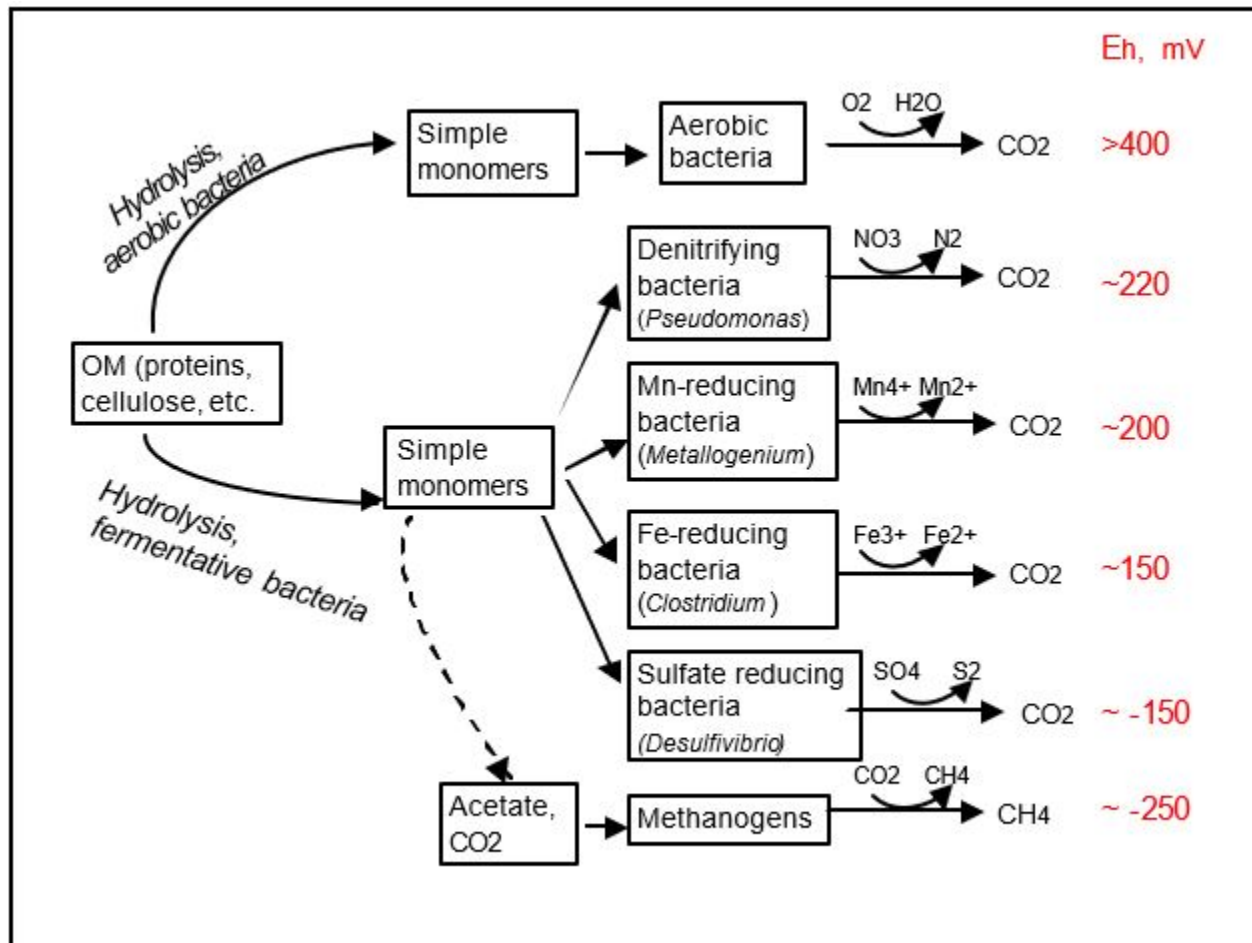
(a)

Συσσωματώματα κοινοπραξιών κυττάρων που οξειδώνουν το μεθάνιο



(b)

Πιθανός μηχανισμός για τη συνεργατική αποικοδόμηση του μεθανίου



Ενεργειακά δυναμικά, τύπος αναπνοής και βακτηριακές ομάδες

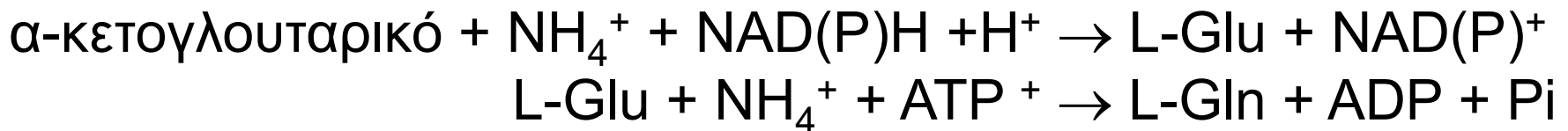
2.7. Ο κύκλος του αζώτου

2.7. Ο κύκλος του αζώτου

2.7.1. Αμμωνιοποίηση:

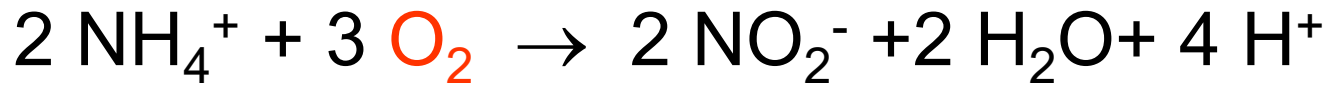
Το οργανικό άζωτο (κυρίως αμινοξέα) $\rightarrow$ NH_4^+ (όλοι οι οργανισμοί)

- Αφομοίωση των ιόντων NH_4^+



2.7.2. Νιτροποίηση: Μετατροπή NH_4^+ σε NO_2^- και NO_3^-

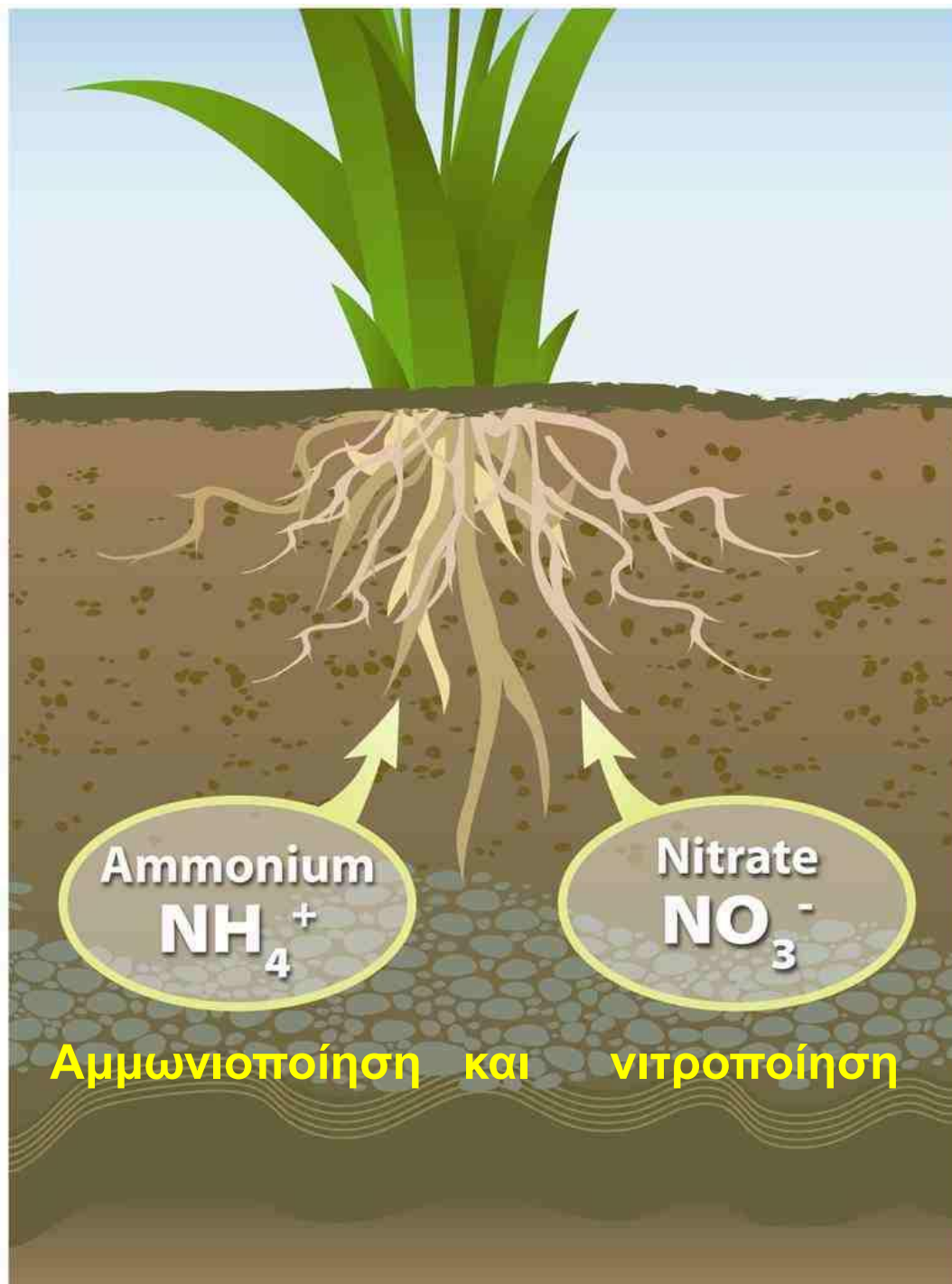
- *Nitrosomonas* ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$)



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



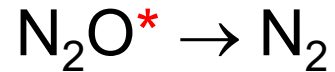
1 + 2: θρέψη των φυτών



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*)

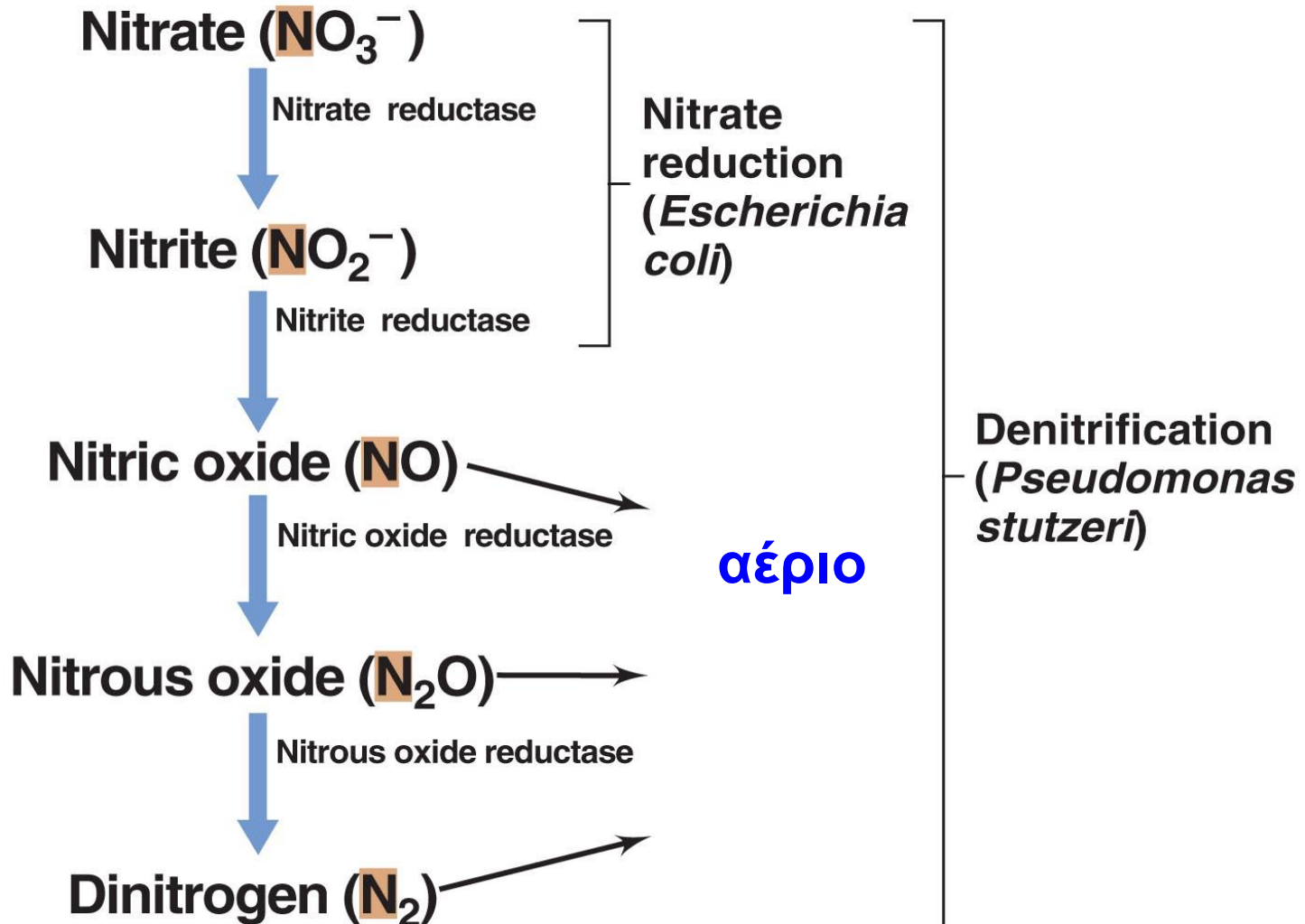


Αναεροβική αναπνοή πολλών οργανισμών

*ΥΠΟ ΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ

2.7.3. Απονίτρωση:

Προϊόντα αναεροβικής αναγωγής των νιτρικών (NO_3^-)



Τα ένζυμα των μεταβολικών αυτών δρόμων καταστέλλονται από το O_2

2.7.3. Απονίτρωση

- Τα περισσότερα προϊόντα της αναγωγής νιτρικών είναι **αέρια** (NO , N_2O , N_2).
- Τα αέρια αυτά που περιέχουν N απομακρύνονται από τους οργανισμούς στην ατμόσφαιρα (**απονίτρωση**).
- Η απονίτρωση είναι η κύρια βιολογική πηγή του αερίου N_2 .

2.7.4. Αφομοιωτική αναγωγή των νιτρικών:

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

2.7.5. Δέσμευση του μοριακού N_2 :

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

Ελεύθεροι δεσμευτές

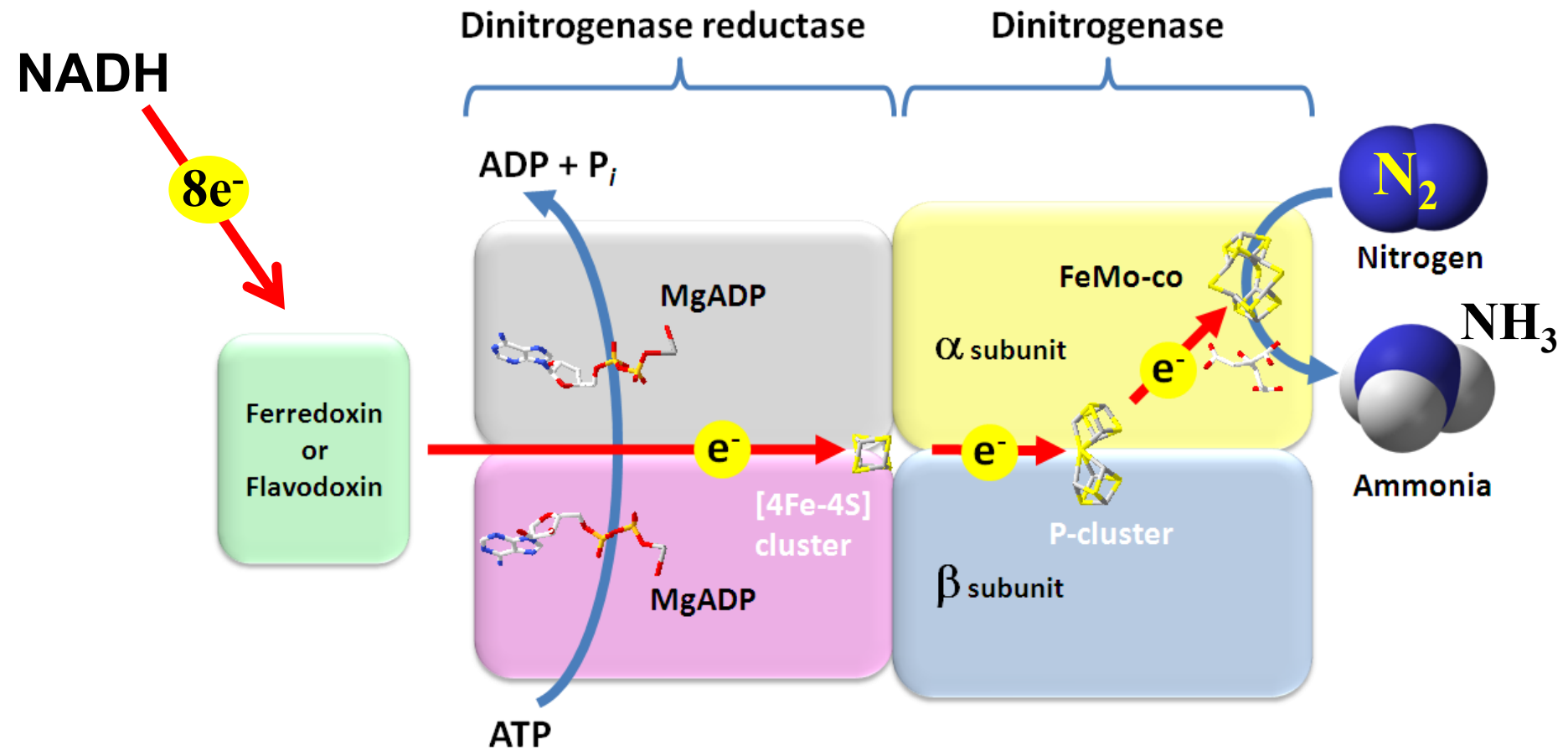
π.χ. *Azotobacter* και *Azospirillum*

Συμβιοτικοί δεσμευτές

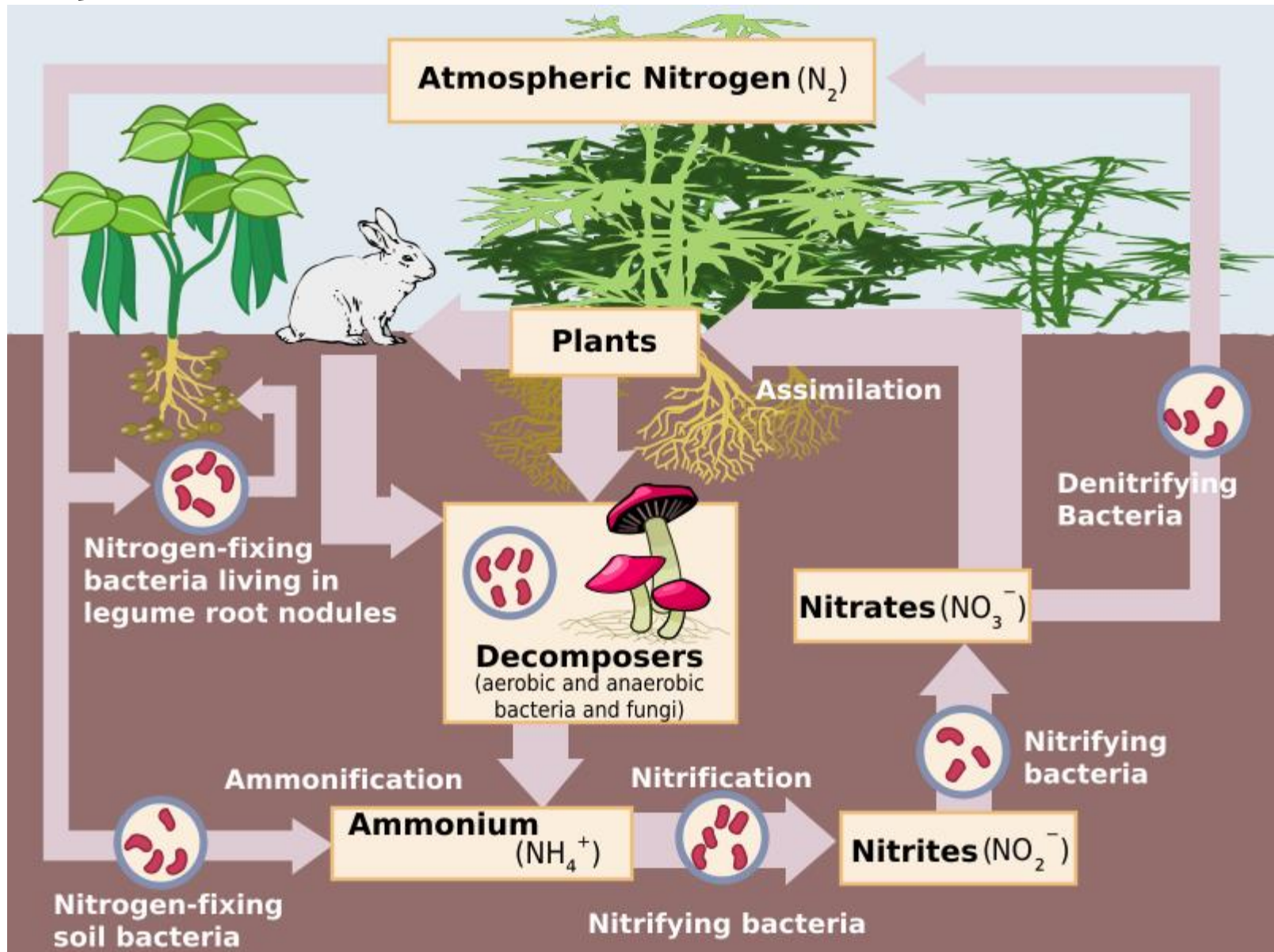
π.χ. *Rhizobium* και *Bradyrhizobium*

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

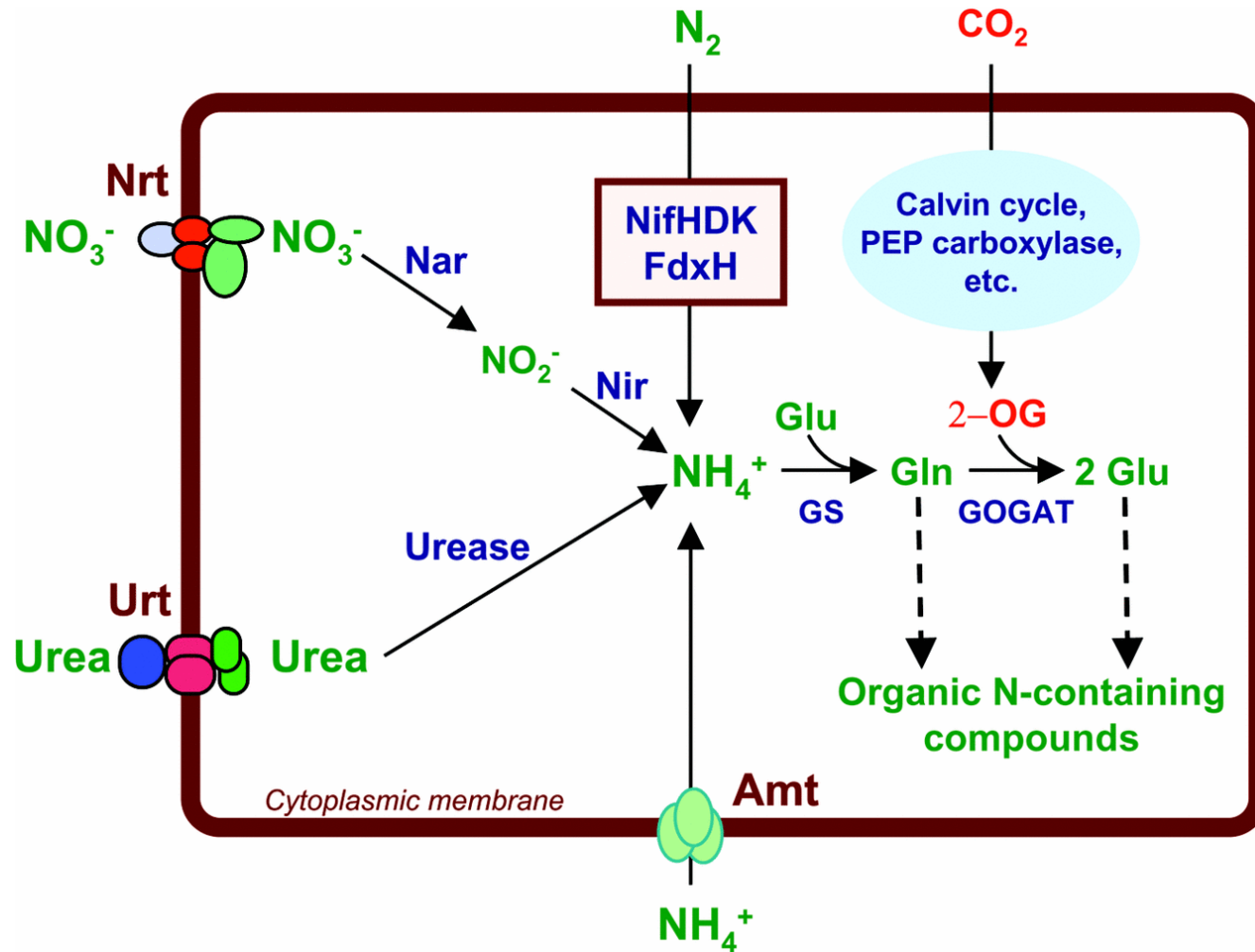
2.7.5. Δέσμευση N₂ μέσω του ενζυμικού συμπλέγματος της νιτρογενάσης



Ο κύκλος του αζώτου



2.7.6. Κύριοι οδοί αφομοίωσης του αζώτου στα κυανοβακτήρια



2.7.7. Τέστ αναγωγής αζώτου



Θετική αναγωγή NO_3^-



Θετική αναγωγή NO_3^-
παρουσία Zn

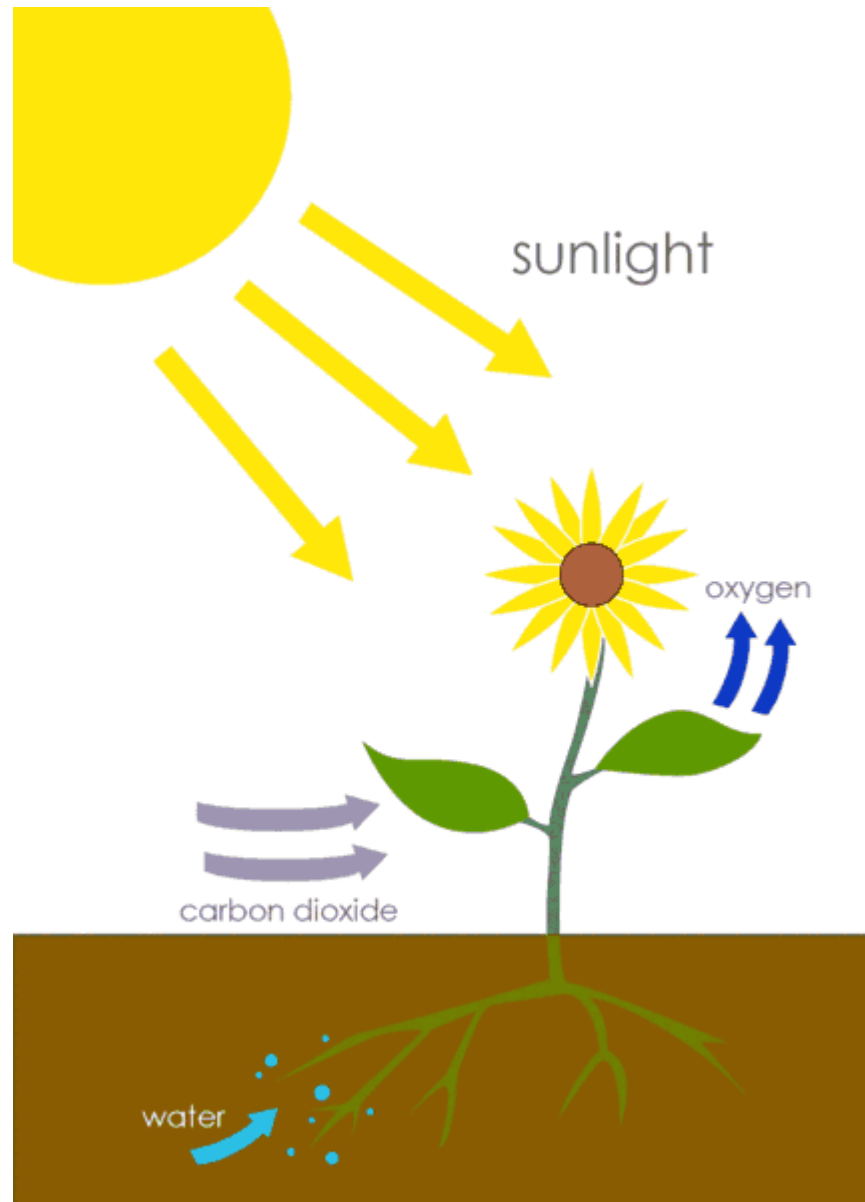


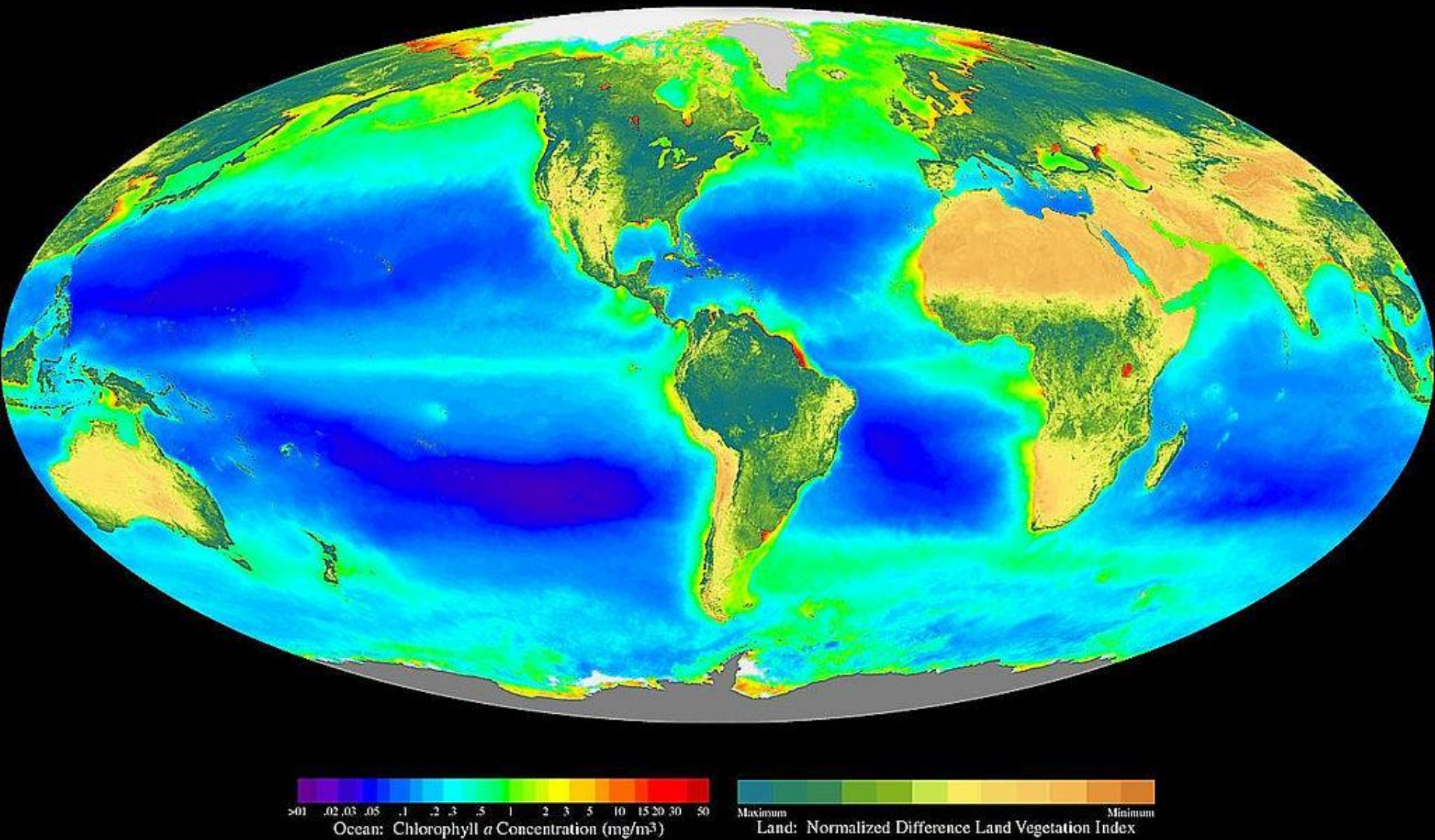
Αρνητική αναγωγή NO_3^-
παρουσία Zn

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_2 σε σάκχαρα $(\text{CH}_2\text{O})_n$
$$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{E} \rightarrow (\text{CH}_2\text{O})_n + \text{O}_2$$
- Έχουμε δέσμευση του C και ανακύκλωσή του στο περιβάλλον (η σημερινή μορφή της ζωής)
- Η φωτοσύνθεση μπορεί να χρησιμοποιεί O_2 (**οξυγονική**):
 - Ανώτερα φυτά, κυανοβακτήρια
 - Υπάρχει και φωτοσύνθεση χωρίς O_2 (**ανοξική**)
 - Πράσινα και πορφυρά βακτήρια, ηλιοβακτήρια

3.2. Μηχανισμός Φωτοσύνθεσης-γενικά χαρακτηριστικά

– A. Αντιδράσεις που εξαρτώνται από το φως

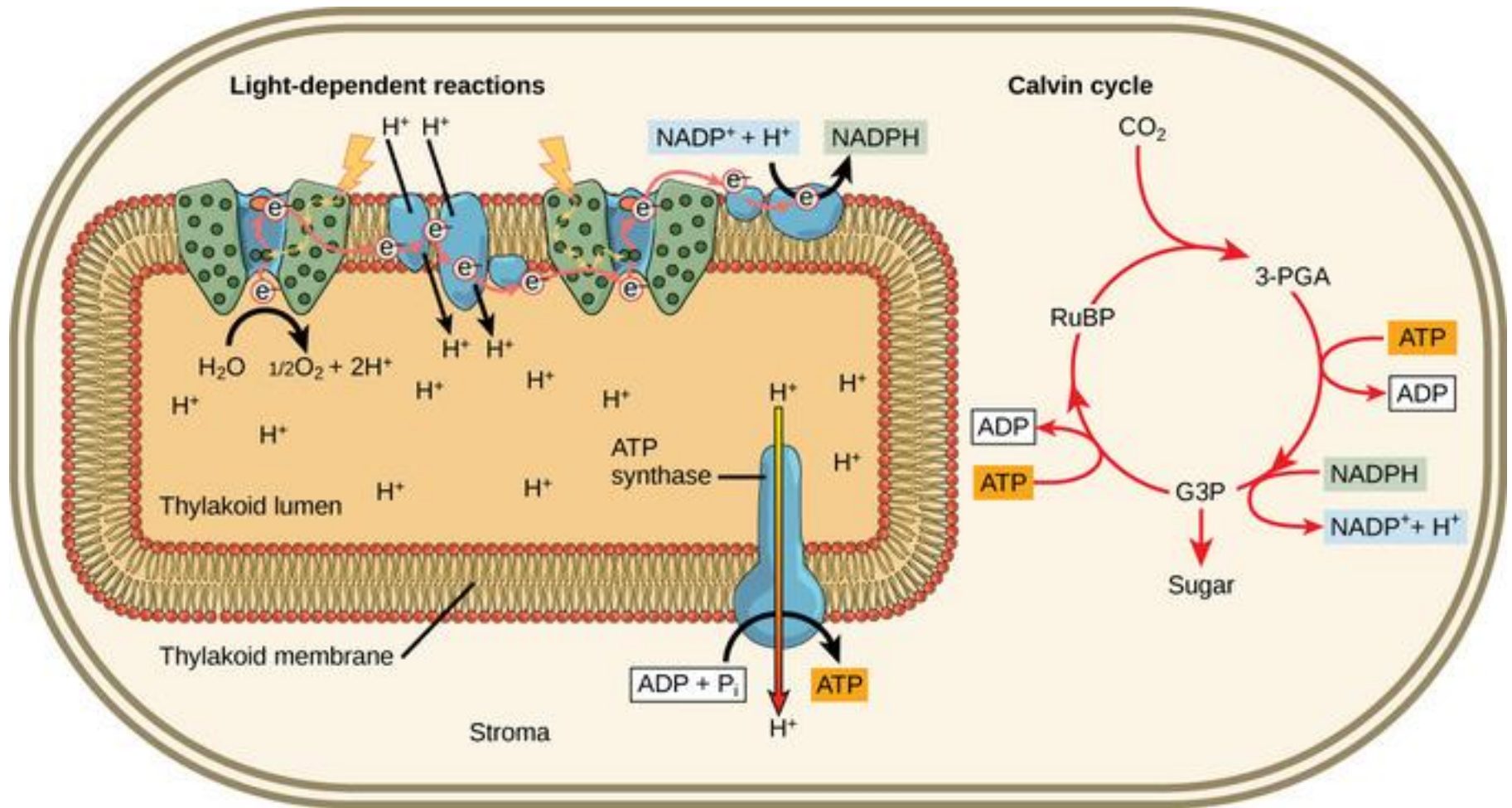
- Η ηλιακή ενέργεια συλλέγεται από τις **φωτοσυνθετικές χρωστικές** που είναι ενσωματωμένες σε μεμβράνες και μεταφέρεται σε ένα ειδικό **κέντρο αντιδράσεων** (RC) που αποτελείται από φωτοσυνθετικές χρωστικές και πρωτεΐνες.
- Η ενέργεια του φωτός χρησιμοποιείται **για να απομακρυνθεί ένα ηλεκτρόνιο** 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_2 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



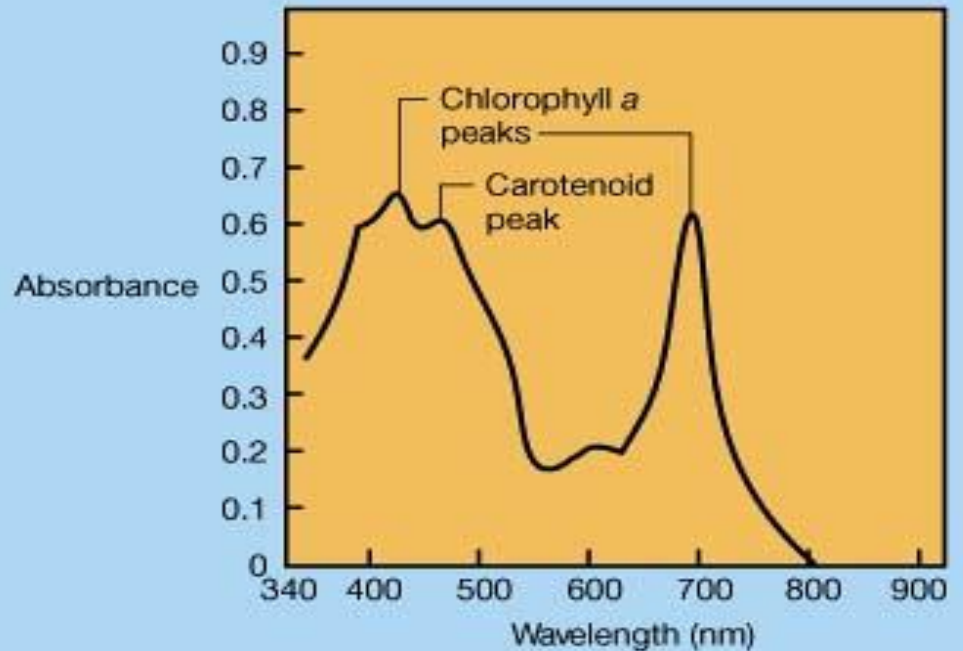
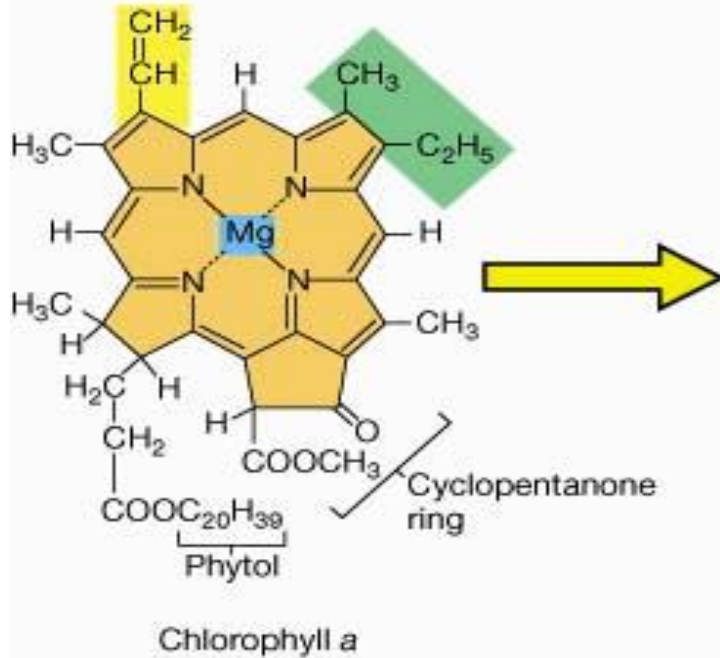
3.3. Φωτοσυνθετικές Χρωστικές

Χλωροφύλλες

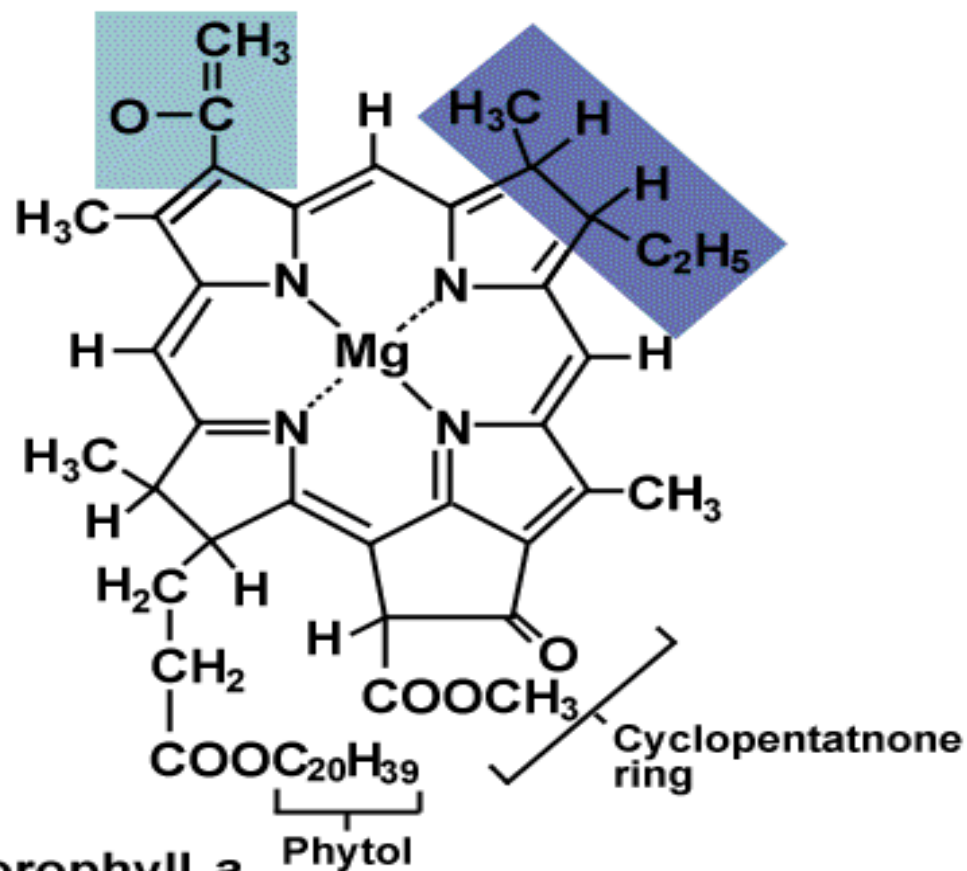
Βακτηριοχλωροφύλλες φωτοσυνθετικών βακτηρίων

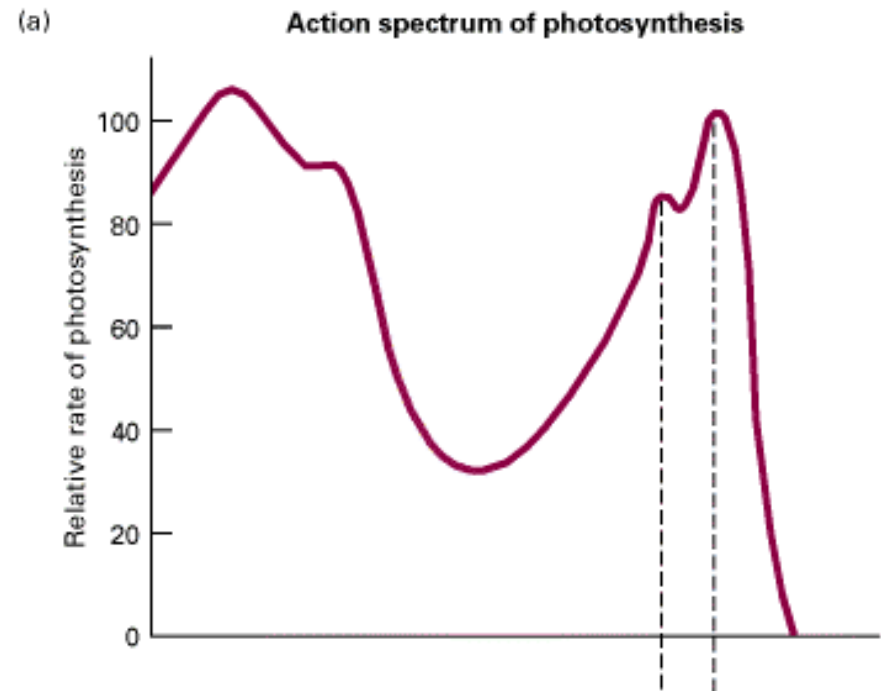
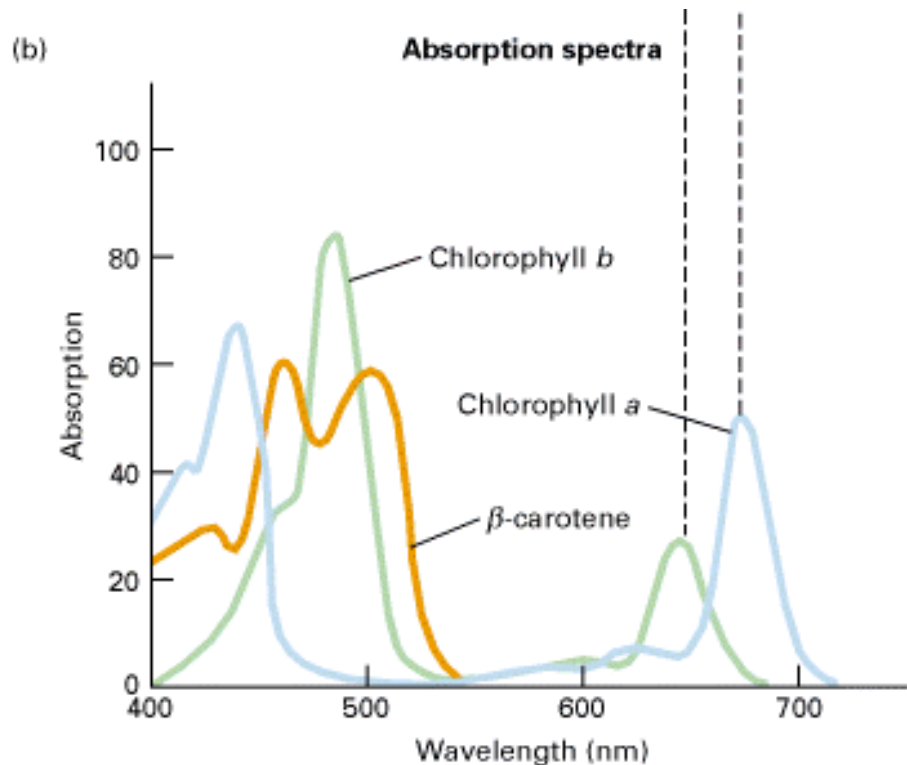
	Δότης e	Αποδέκτης e
Πορφυρά μη θείο βακτήρια	Βακτηριοχλωροφύλλες a, b	Βακτηριοφαιοφυτίνες a, Q _A , Q _B
Πράσινα θείο βακτήρια	Βακτηριοχλωροφύλλες c, d, e	Βακτηριοφυτίνη a και πρωτεΐνες FeS
Κυανοβακτήρια, ΦΣ1	Χλωροφύλλη a	Χλωροφύλλη a και πρωτεΐνες FeS
Κυανοβακτήρια, ΦΣ2	Χλωροφύλλη a	Φαιοφυτίνη a, Q _A , Q _B και πλαστοκινόνες
Ηλιοβακτήρια	Βακτηριοχλωροφύλλη g	Βακτηριοχλωροφύλλη c, πρωτεΐνες FeS
Φυτά	Χλωροφύλλη b	

Χλωροφύλλη α

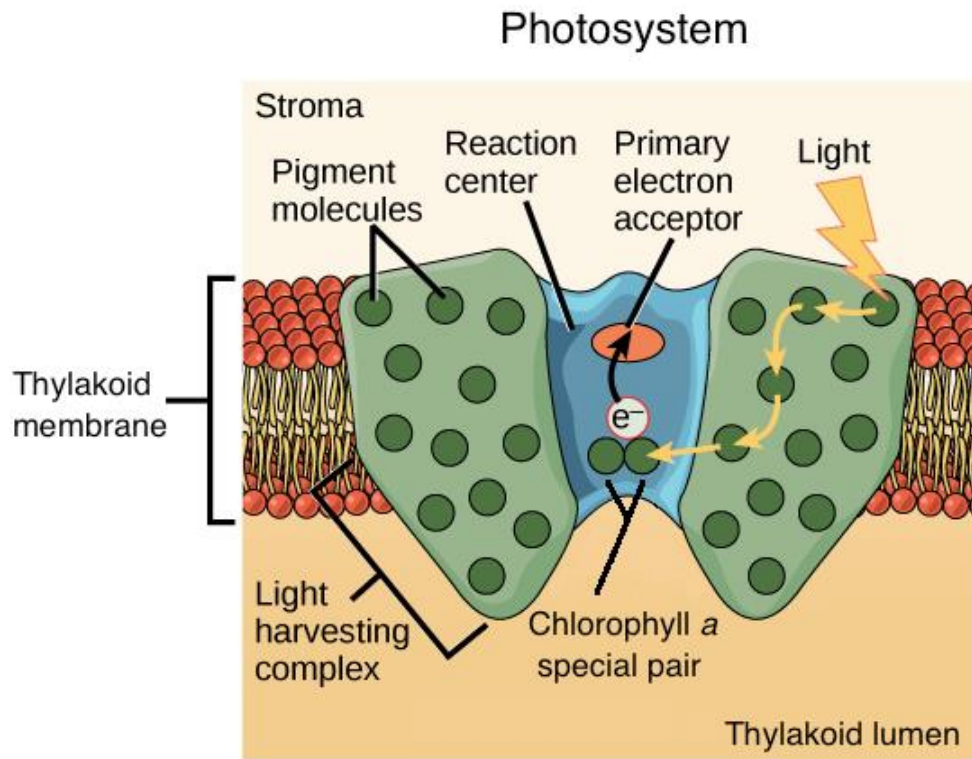


Βακτηριοχλωροφύλλη α





Φάσματα απορρόφησης χλωροφυλλών a, b και β καροτενίου και ρυθμός φωτοσύνθεσης ανά μήκος κύματος



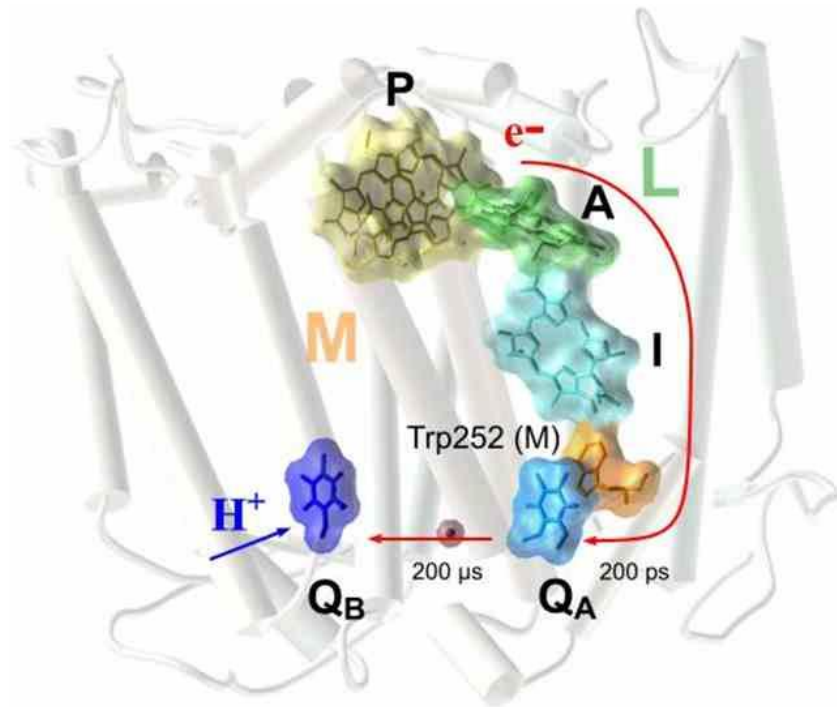
Οι φωτοσυνθετικές χρωστικές δρουν ως ενεργειακή χοάνη, μεταφέροντας ενέργεια από το φως προς ένα κύριο **κέντρο αντίδρασης (RC)**.

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>

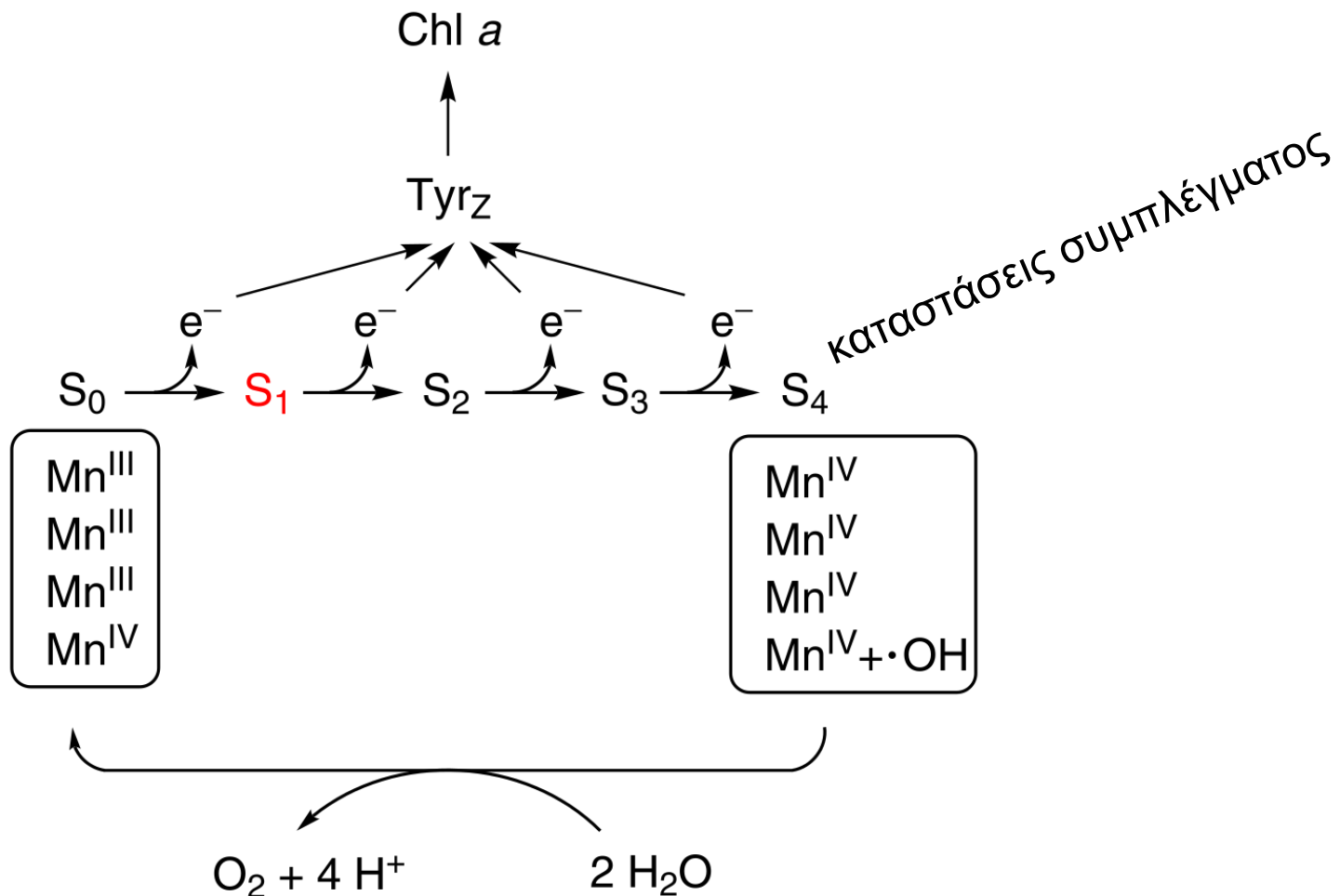
Κέντρο αντιδράσης (RC) για τη μεταφορά ηλεκτρονίων και πρωτονίων

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 (μs -ms). Η μεταφορά ηλεκτρονίων από το Q_A στο Q_B είναι συνδυασμένη με **πρόσληψη πρωτονίων** από το κυτταρόπλασμα.



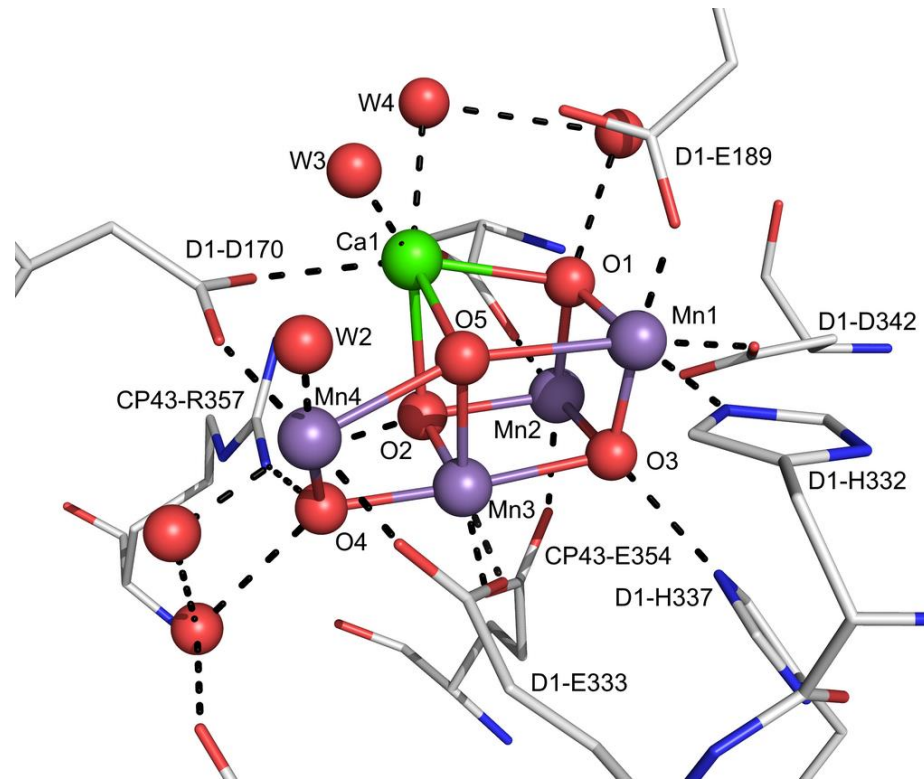
Απορρόφηση δευτέρου φωτονίου από το **P^+** , επάγει τη διπλή αναγωγή και πρωτονίωση της δεύτερης κινόνης Q_B και οδηγεί στο σχηματισμό του $Q_B H_2$, το οποίο απελευθερώνεται από το RC. Ο σχηματισμός της κινόλης ($Q_B H_2$) έχει καίρια σημασία για τη φωτοσύνθεση καθώς η απελευθέρωσή της ξεκινά το σχηματισμό της κλίσης πρωτονίων που είναι υπεύθυνη για τη σύνθεση του ATP.

Το ηλεκτρόνιο που στέλνεται από τις χλωροφύλλες στην κινόνη αναπληρώνεται από την οξείδωση του νερού σε ειδικό κέντρο, το «**σύμπλεγμα που παράγει οξυγόνο**»



Το «σύμπλεγμα που παράγει οξυγόνο» αποτελείται από ένα σύμπλοκο μαγγανίου και ασβεστίου με τον τύπο $\text{Mn}_4\text{Ca}_1\text{O}_x\text{Cl}_{1-2}(\text{HCO}_3)_y$. Συνδέεται με τις υπομονάδες D1 και CP43 και σταθεροποιείται από πρωτεΐνες της περιφερειακής μεμβράνης.

Ο μηχανισμός του συμπλόκου προτείνεται να περιλαμβάνει ένα οξείδιο του Mn το οποίο συνδέεται μέσω σχηματισμού δεσμού O-O με ένα οξείδιο/υδροξείδιο του ασβεστίου.

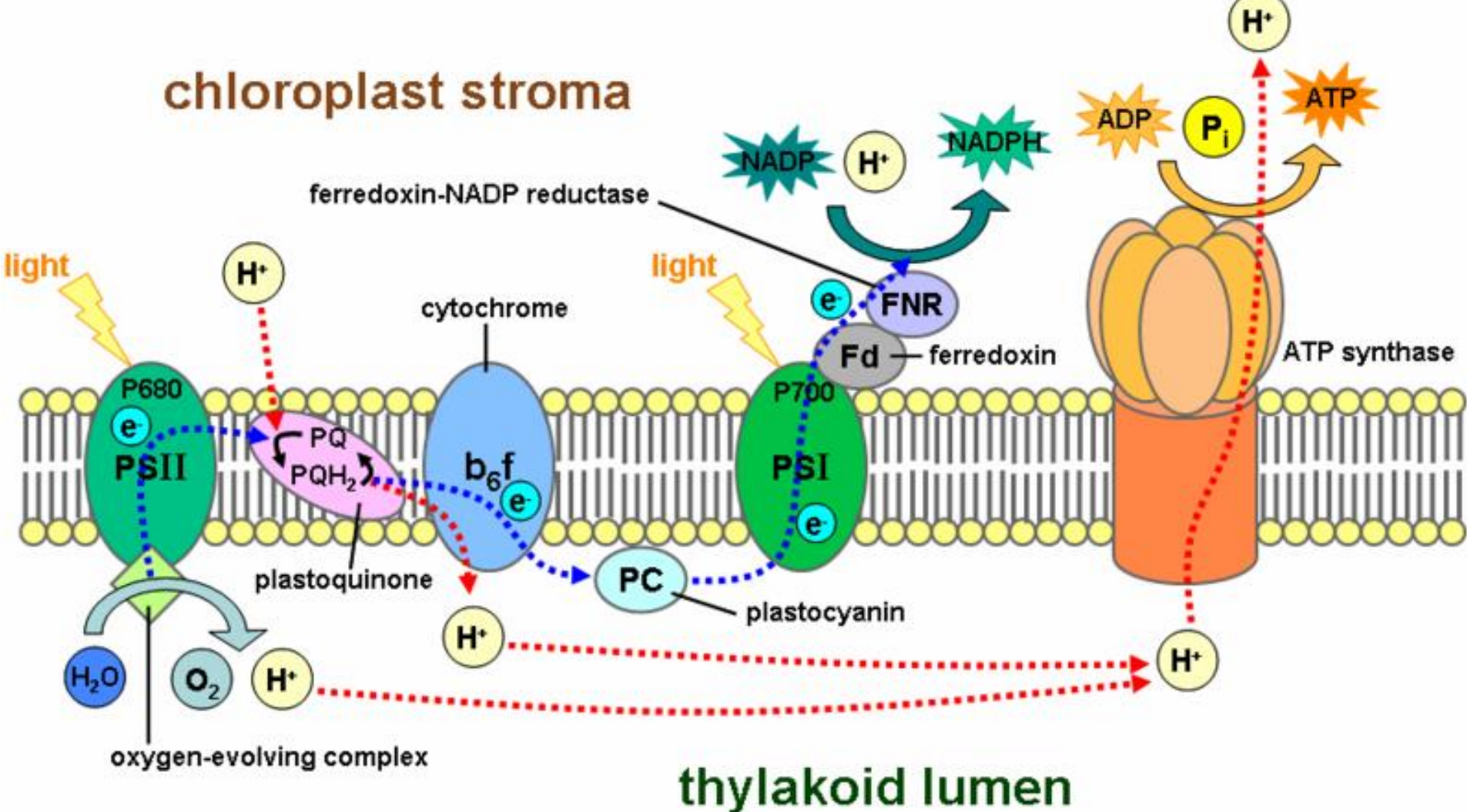


3.3.1. Οξυγονική φωτοσύνθεση

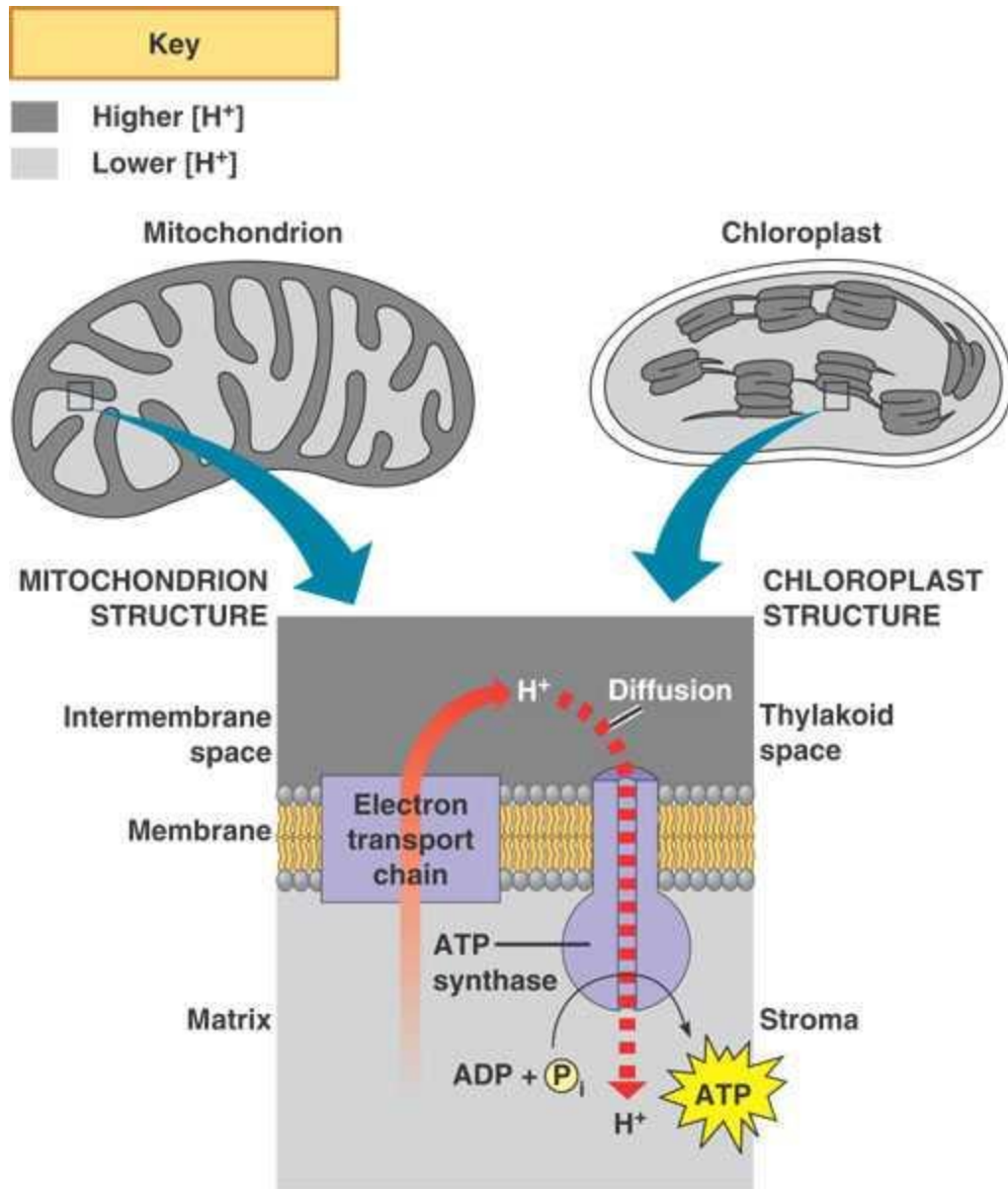
Α. Αντιδράσεις που εξαρτώνται από το φως

- 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).

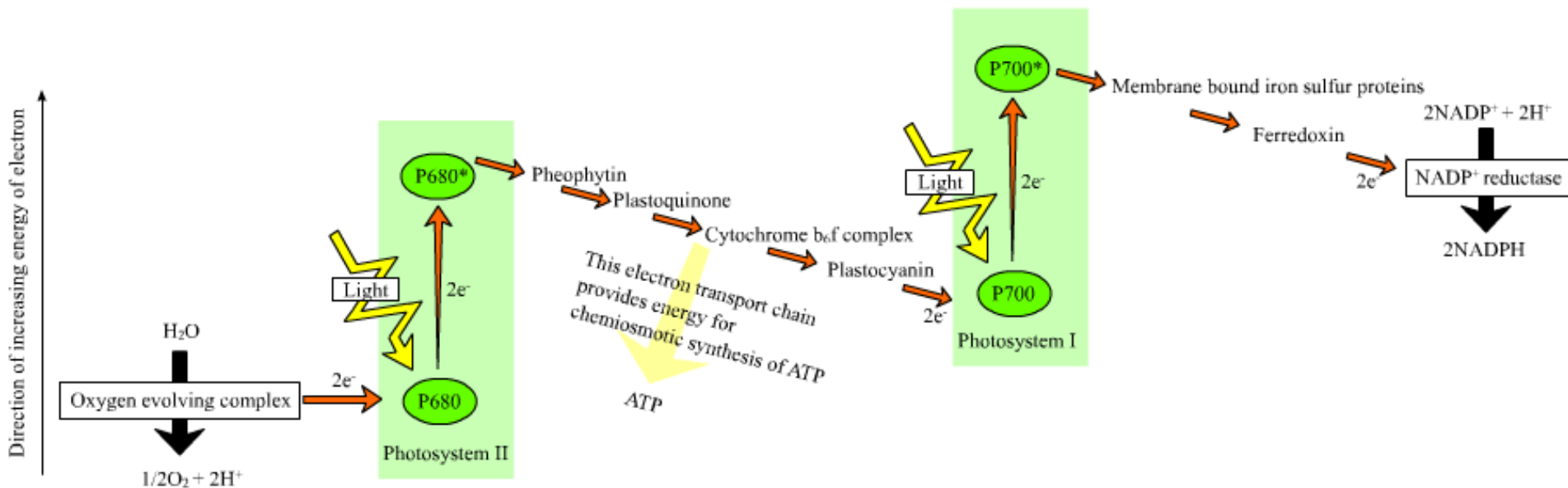
chloroplast stroma



«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 ...»

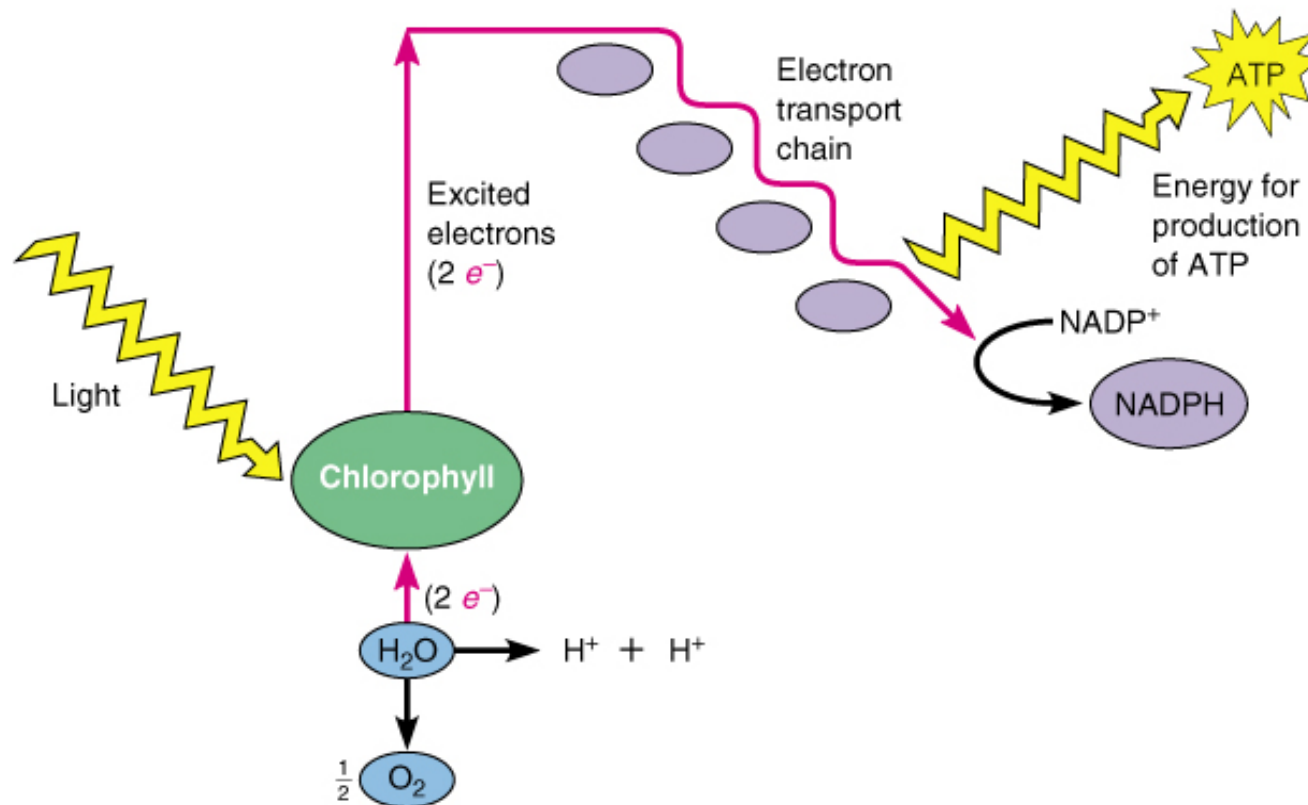


Περίληψη **χημειώσωσης** στο μιτοχόνδριο και χλωροπλάστες



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 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

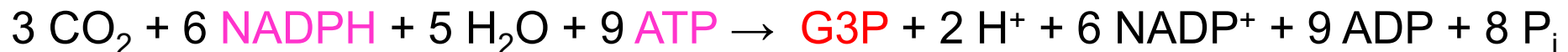
A. Αντιδράσεις που εξαρτώνται από το φως

Η ενέργεια από τη φωτεινή αντίδραση (ATP και NADPH) χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του CO₂ σε σάκχαρα στον κύκλο του Calvin.

B. Αντιδράσεις που δεν εξαρτώνται από το φως

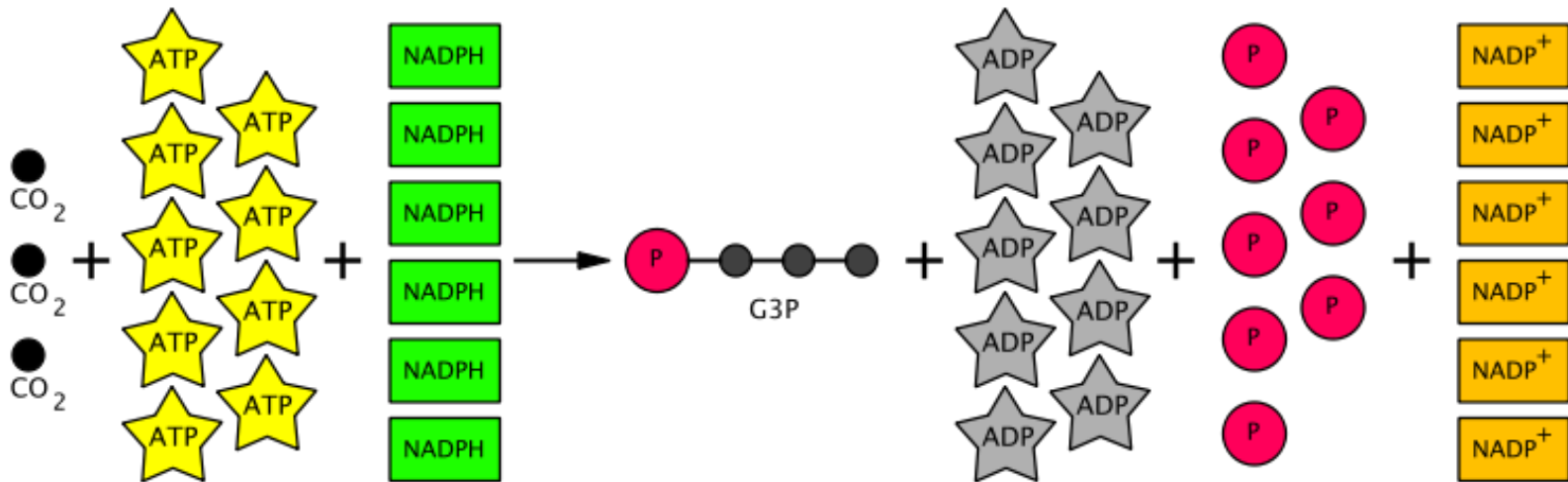
Η ενέργεια από τη φωτεινή αντίδραση (ATP και NADPH) χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του CO₂ σε σάκχαρα.

Συνολική αντίδραση (A και B):



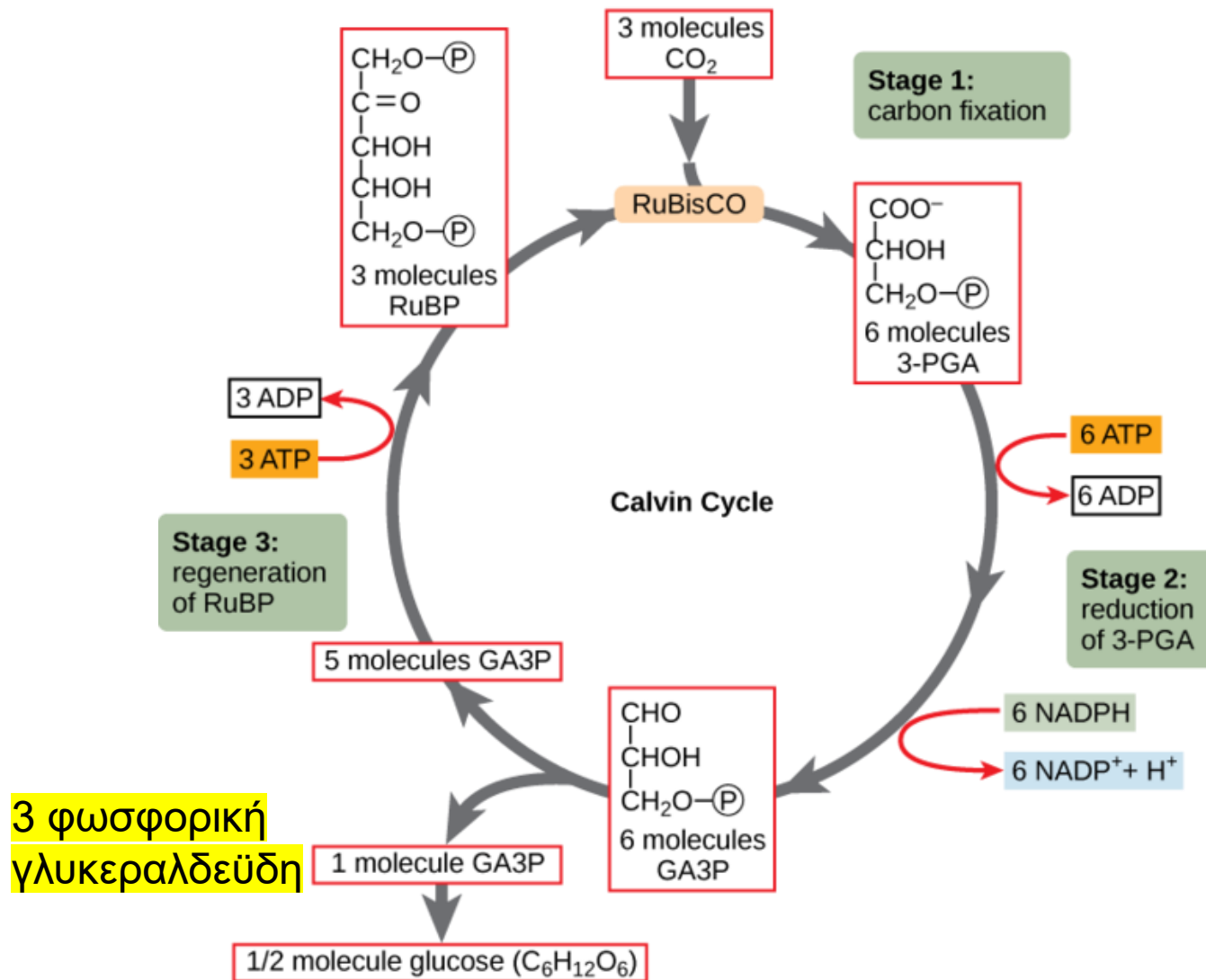
Β. Αντιδράσεις που δεν εξαρτώνται από το φως

Η ενέργεια από τη φωτεινή αντίδραση (ATP και NADPH) χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του CO_2 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.

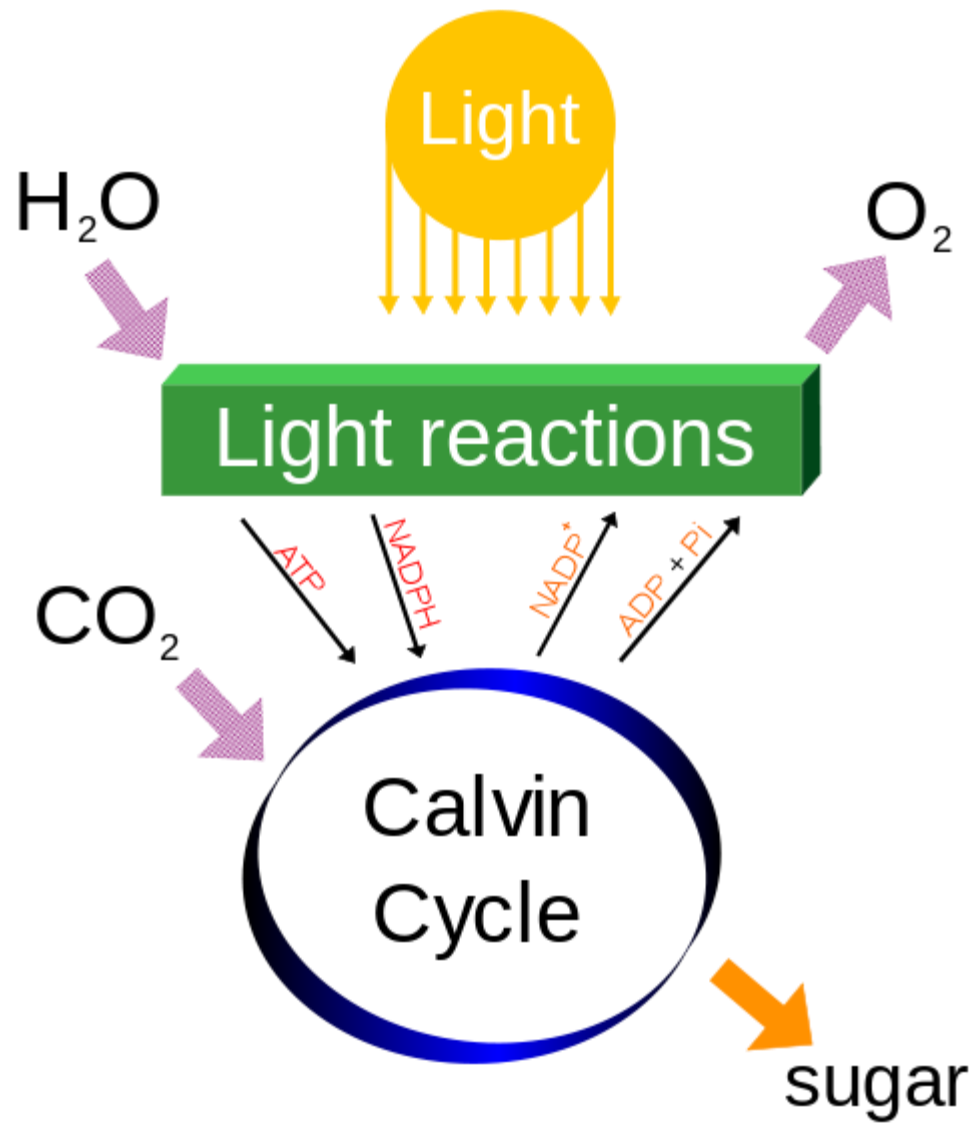
Πλεονάζουσες G3P μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να σχηματισθούν άλλοι υδατάνθρακες όπως άμυλο, σακχαρόζη, και κυτταρίνη, ανάλογα με το τι χρειάζεται το φυτό.



3 φωσφορική
γλυκεραλδεϋδη

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

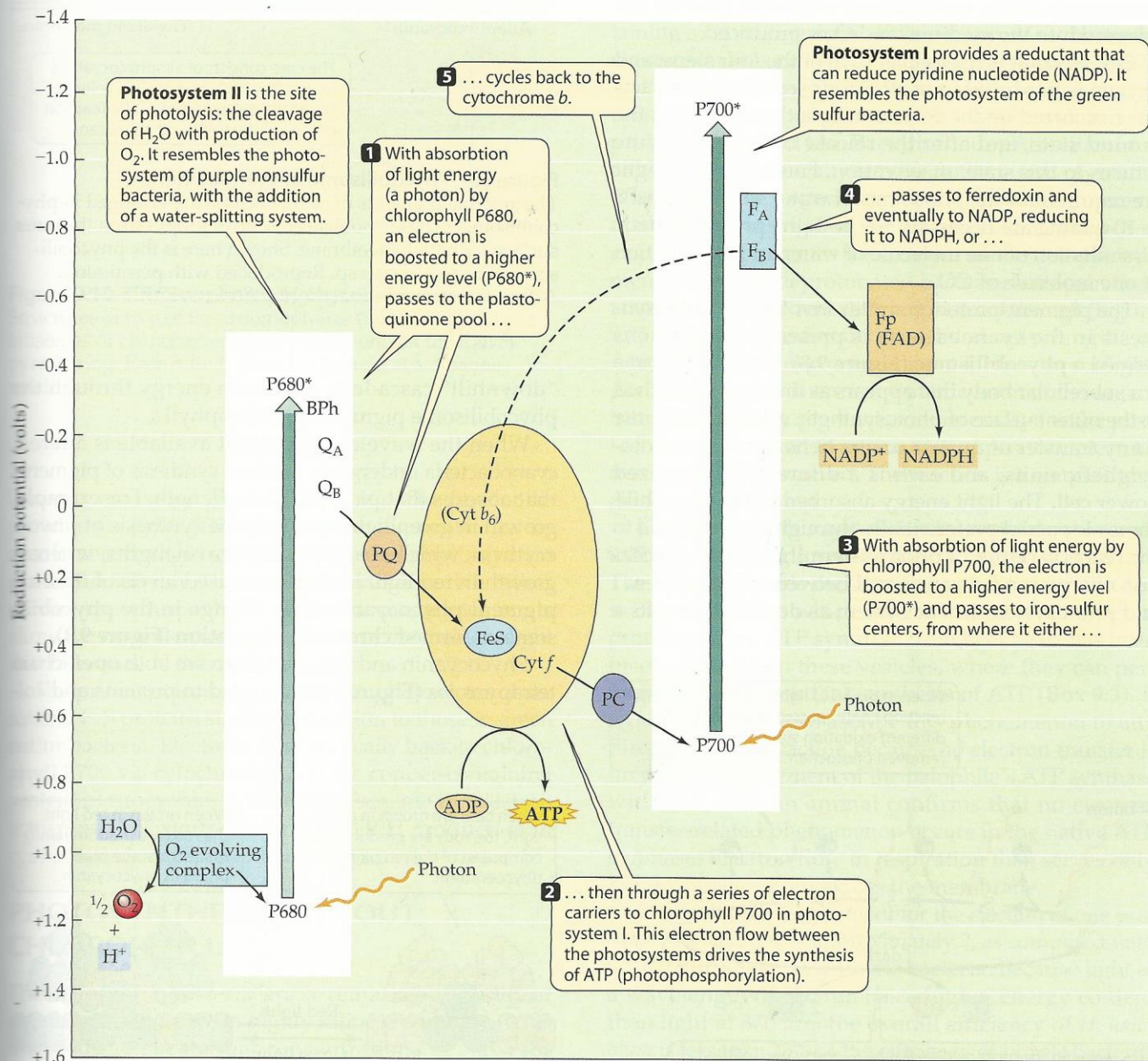


Figure 9.6 Electron flow in reaction center of a cyanobacterium

A cyanobacterium has two photosystems, designated photosystems I and II (PSI and PSII). BPh, bacteriopheophytin; Q_A , Q_B , PQ, plastoquinones; FeS, iron-sulfur center; PC, plastocyanin; F_A , F_B , iron-sulfur centers; Fd, ferredoxin; Fp(FAD), the flavoprotein enzyme ferredoxin-NADP $^+$ reductase.

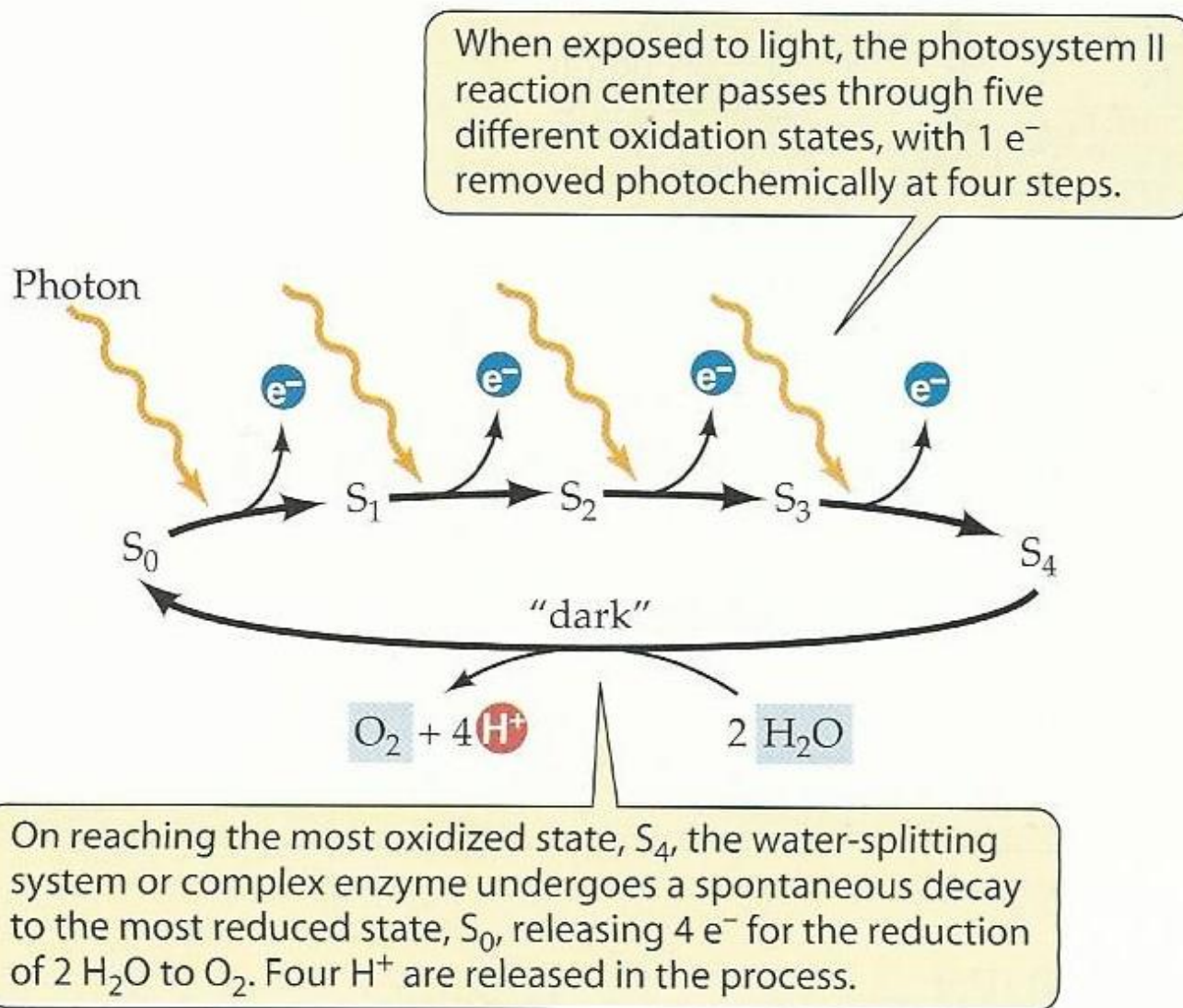
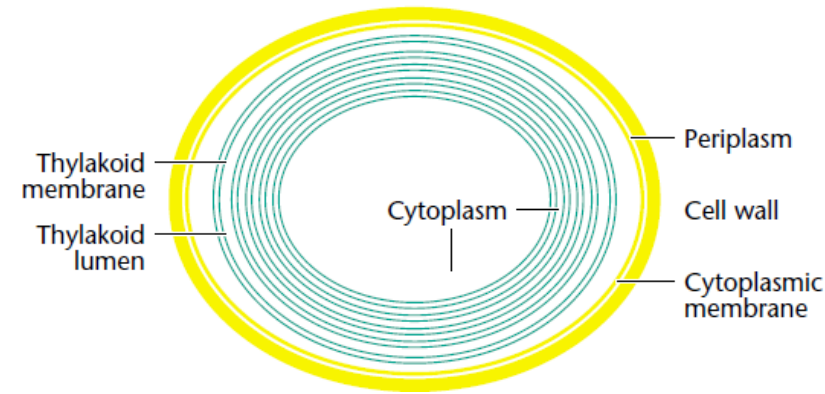
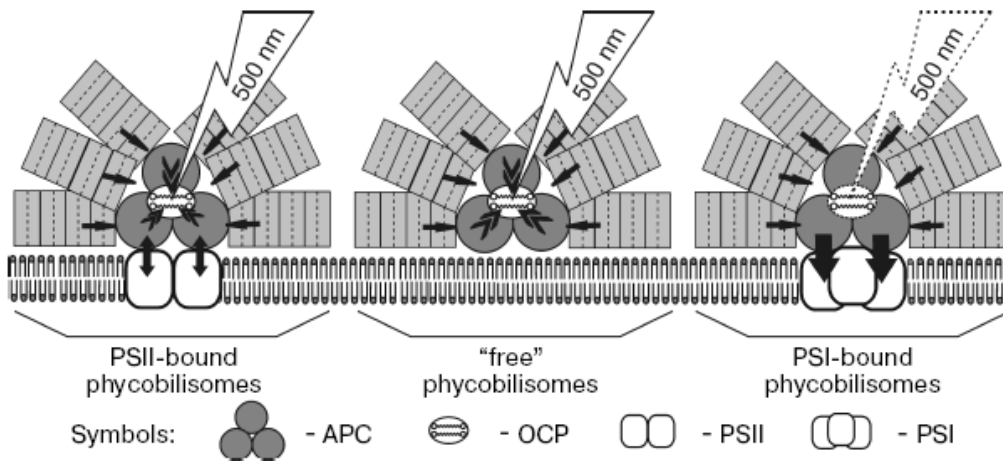


Figure 9.7 Photolysis reaction of photosystem II
Evolution of one molecule of oxygen requires the stepwise accumulation of four oxidizing equivalents in photosystem II.

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.

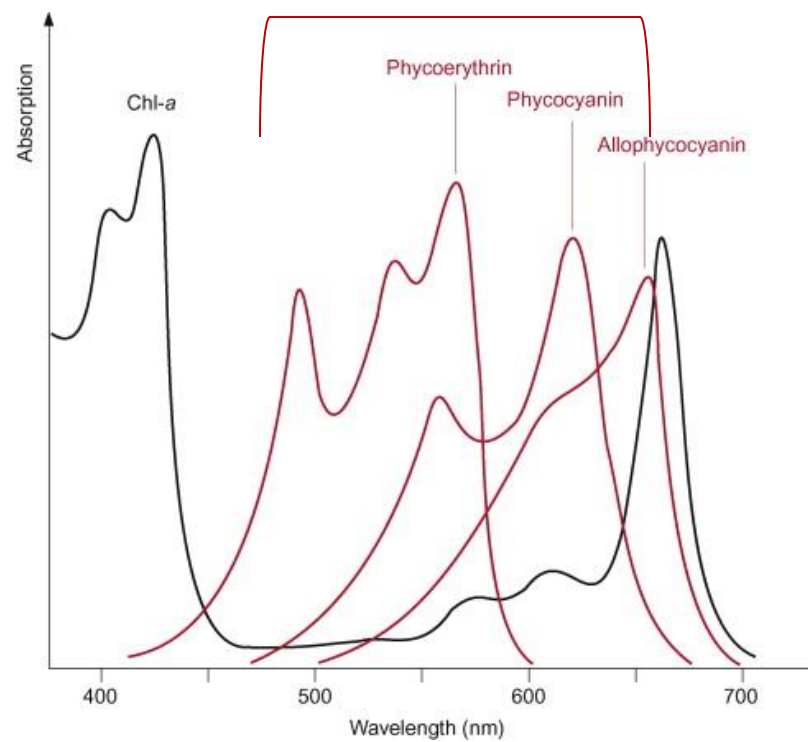
Η ιδιότητα αυτή αξιοποιείται από τα κυανοφύκη σε μεγαλύτερα βάθη όπου τα μήκη κύματος του φωτός είναι μικρότερα.

http://www.synechocystis.asu.edu/pdf/photosyn_%20resp.pdf

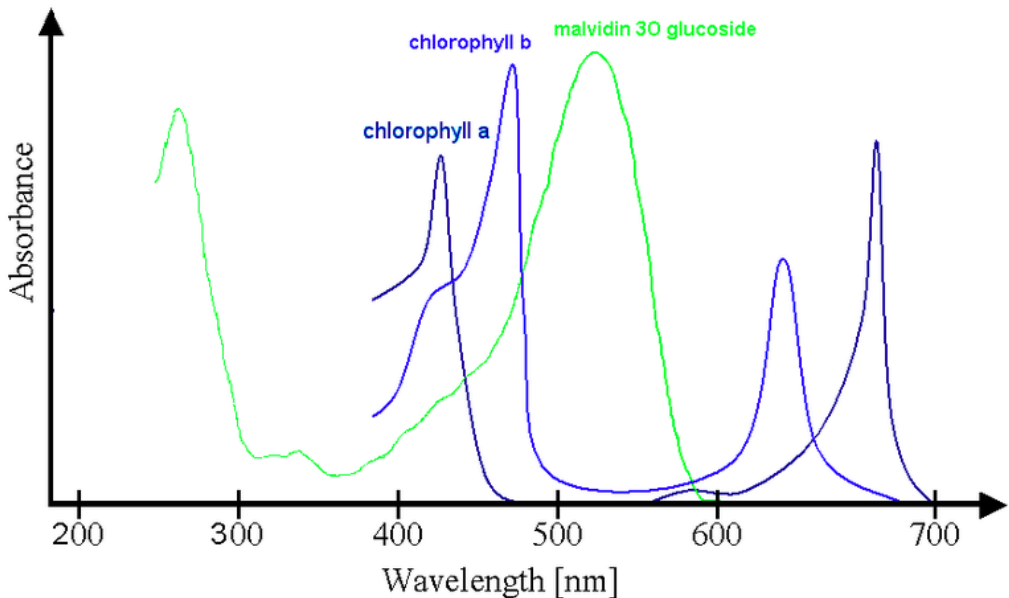
Σύγκριση φασμάτων απορρόφησης

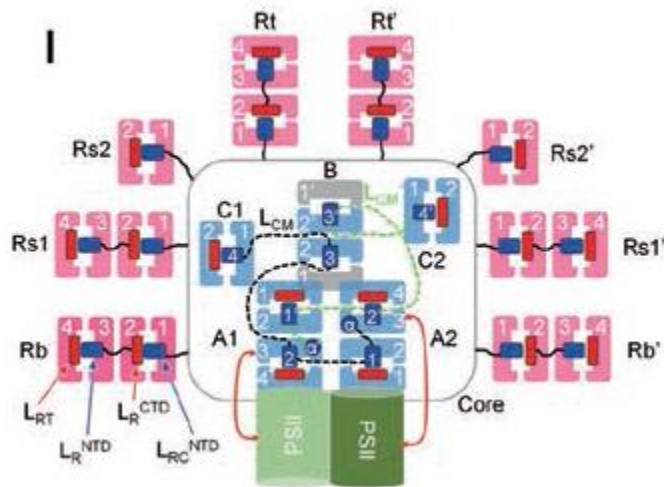
Φυκοβιλινών

<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.

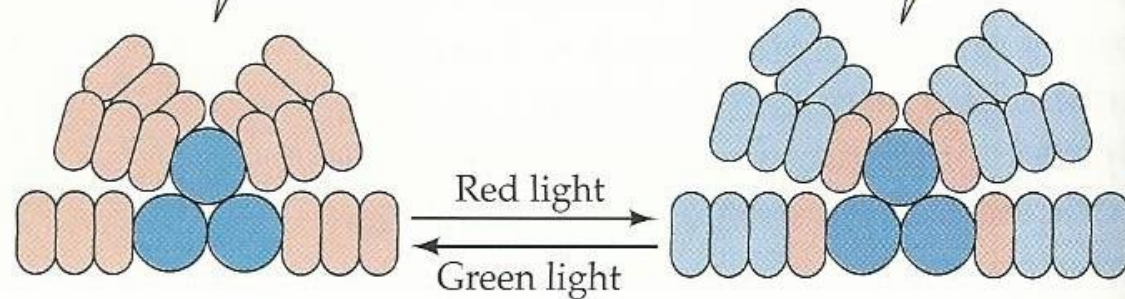


Figure 9.9 Chromatic adaptation of a phycobilisome

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 α.

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 καροτενοειδή 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.

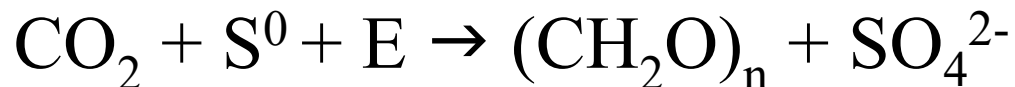
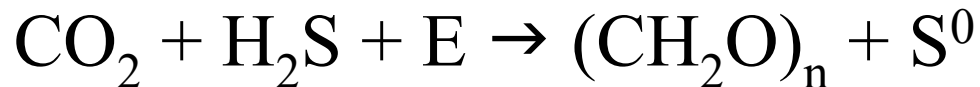
3.2.2. Ανοξική φωτοσύνθεση, γενικά χαρακτηριστικά

2. Δότες ηλεκτρονίων-όχι το H₂O

➤ H₂S, S, Na₂S₂O₃ (θειοθειικό νάτριο) και H₂ στα πράσινα και πορφυρά θειοβακτήρια

➤ H₂ ή οργανικές ενώσεις (φουμαρικό, ισοπροπανόλη κλπ) στα πράσινα και πορφυρά **μη** θειοβακτήρια

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



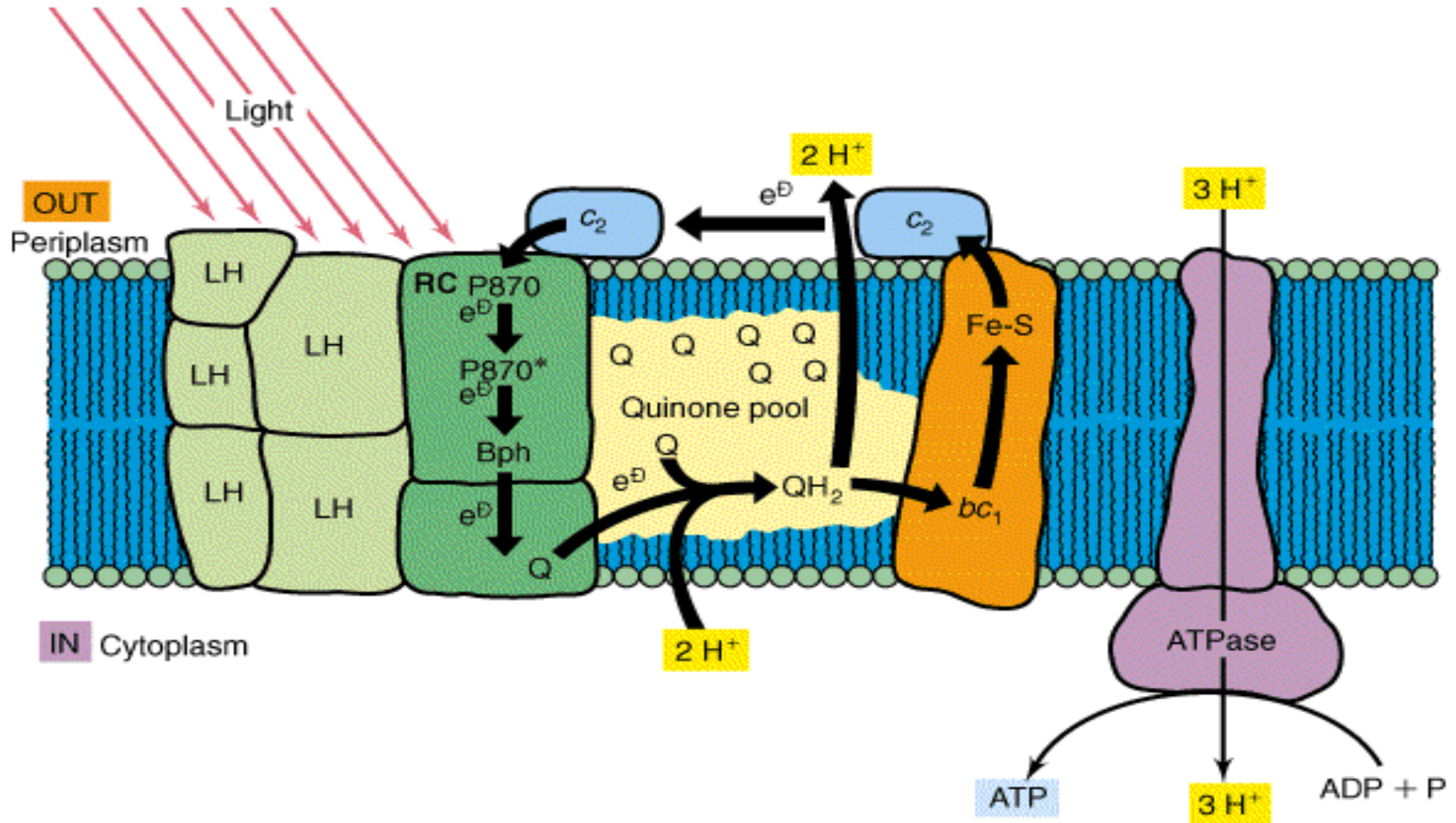
3.2.2. Ανοξική φωτοσύνθεση, γενικά χαρακτηριστικά

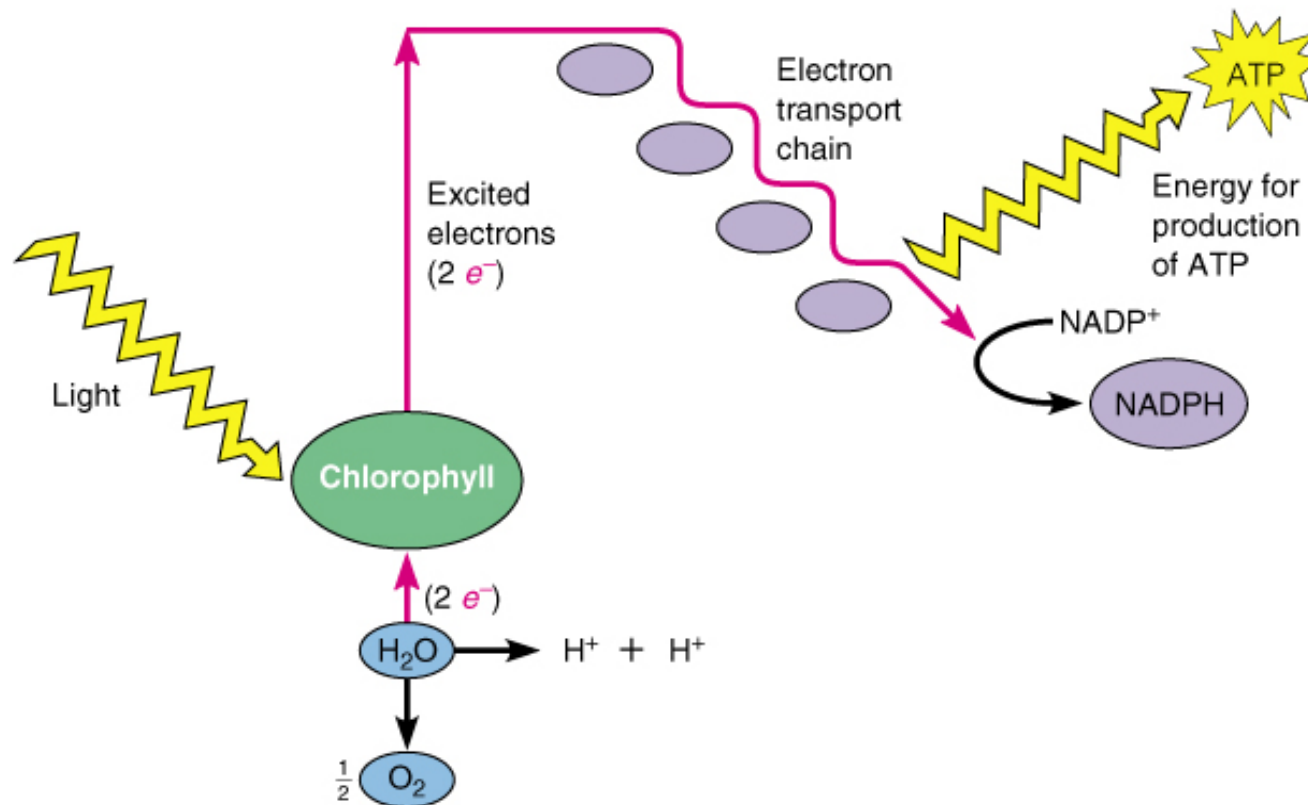
3. Μόνο **ένα** φωτοσύστημα (PS)

- 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



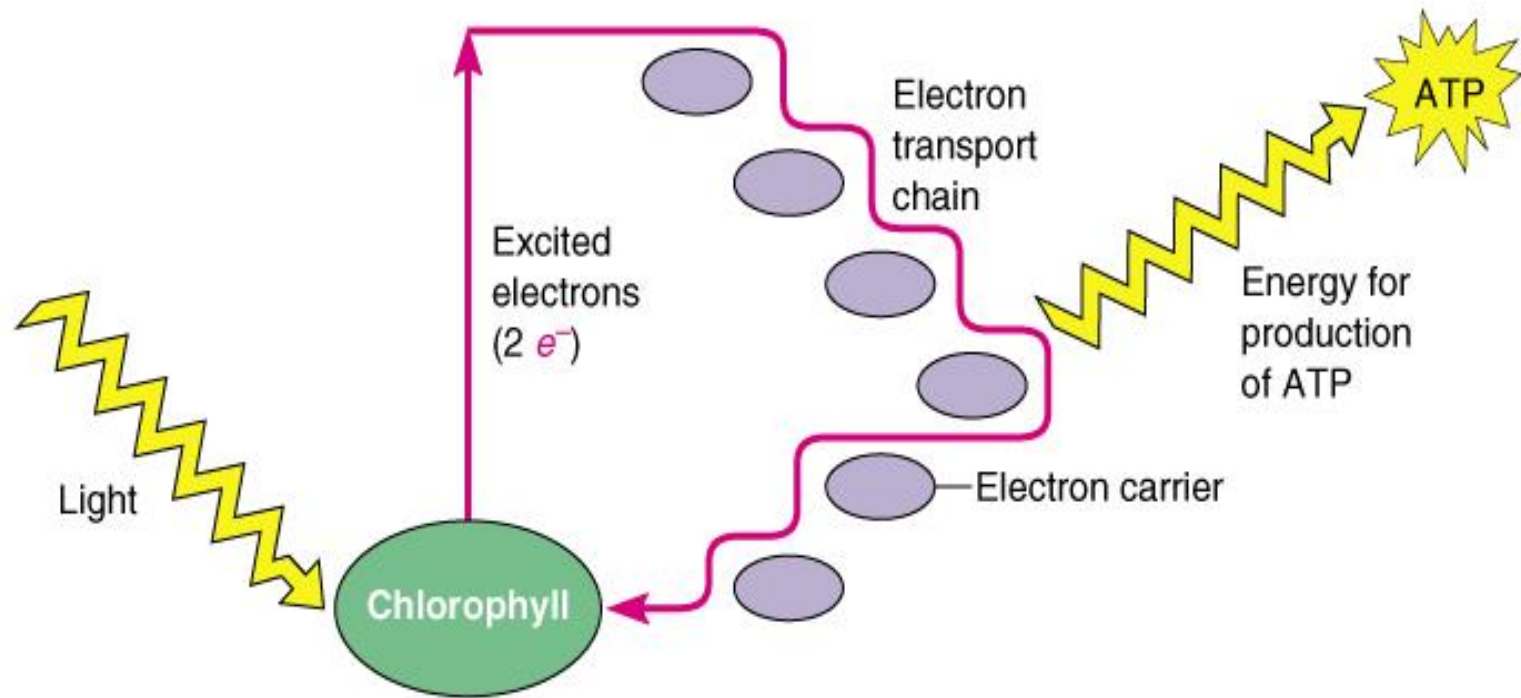


(b) Noncyclic photophosphorylation

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



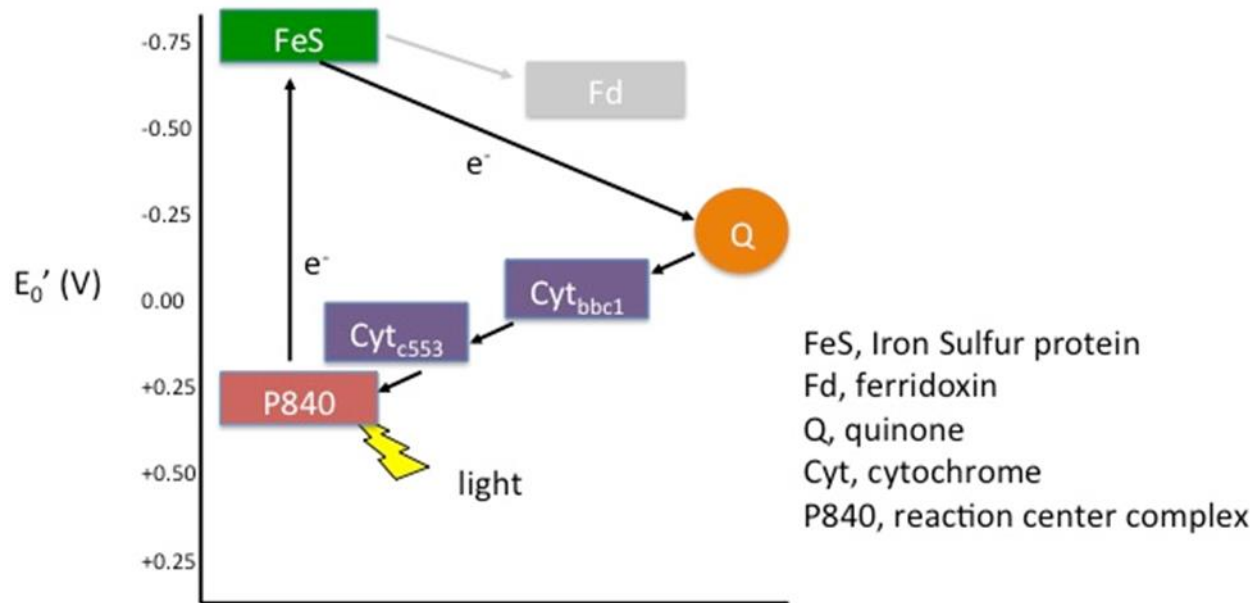
(a) Cyclic photophosphorylation

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

3.2.5. Κυκλική φωτοσύνθεση:

Ροή ηλεκτρονίων εντός του PSI
Παραγωγή μόνο ATP

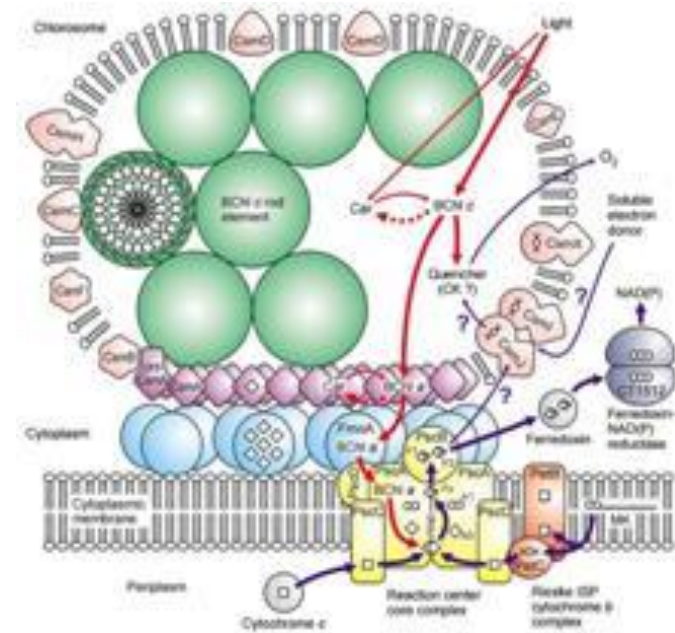
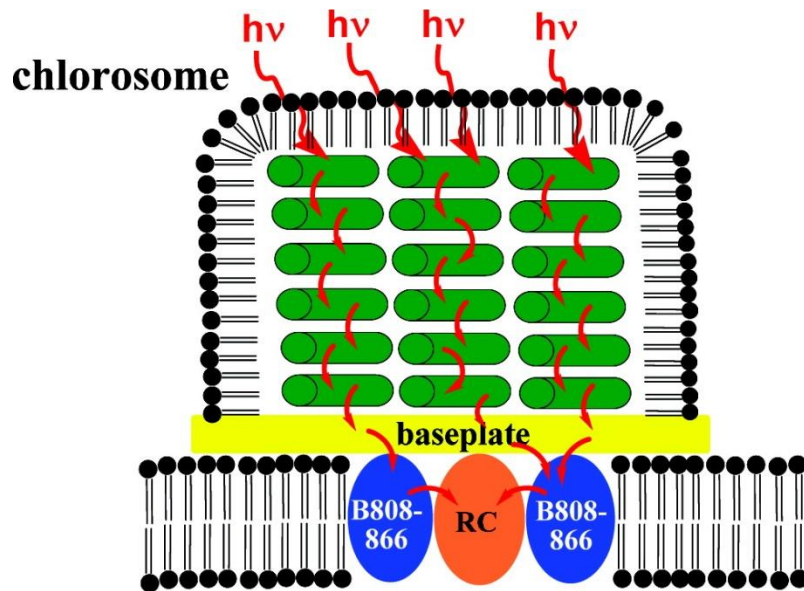
Cyclic photophosphorylation:



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

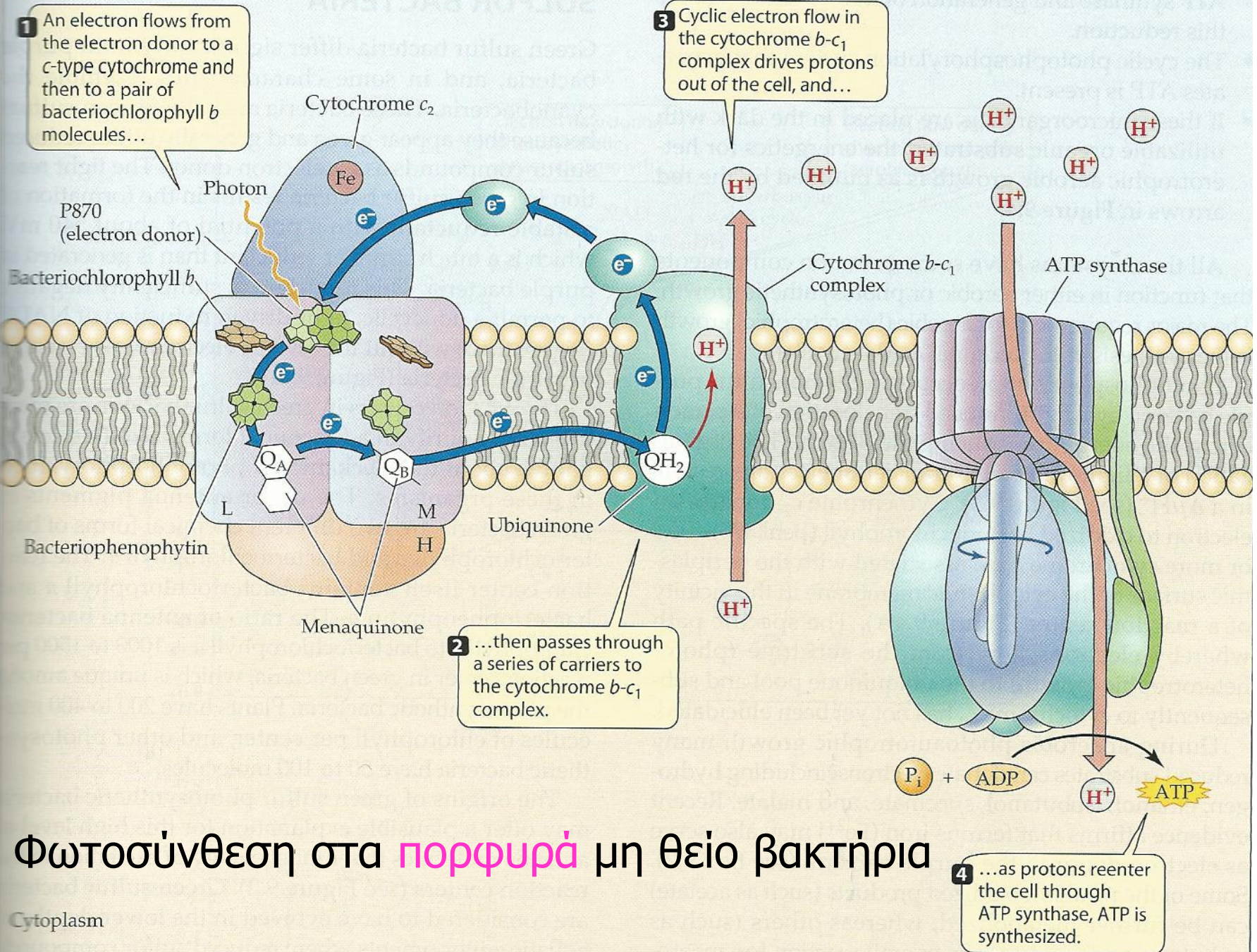


Τα **χλωροσώματα** συλλαμβάνουν την ενέργεια του φωτός και τη μεταφέρουν στο κέντρο αντίδρασης για τη φωτοσύνθεση.

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

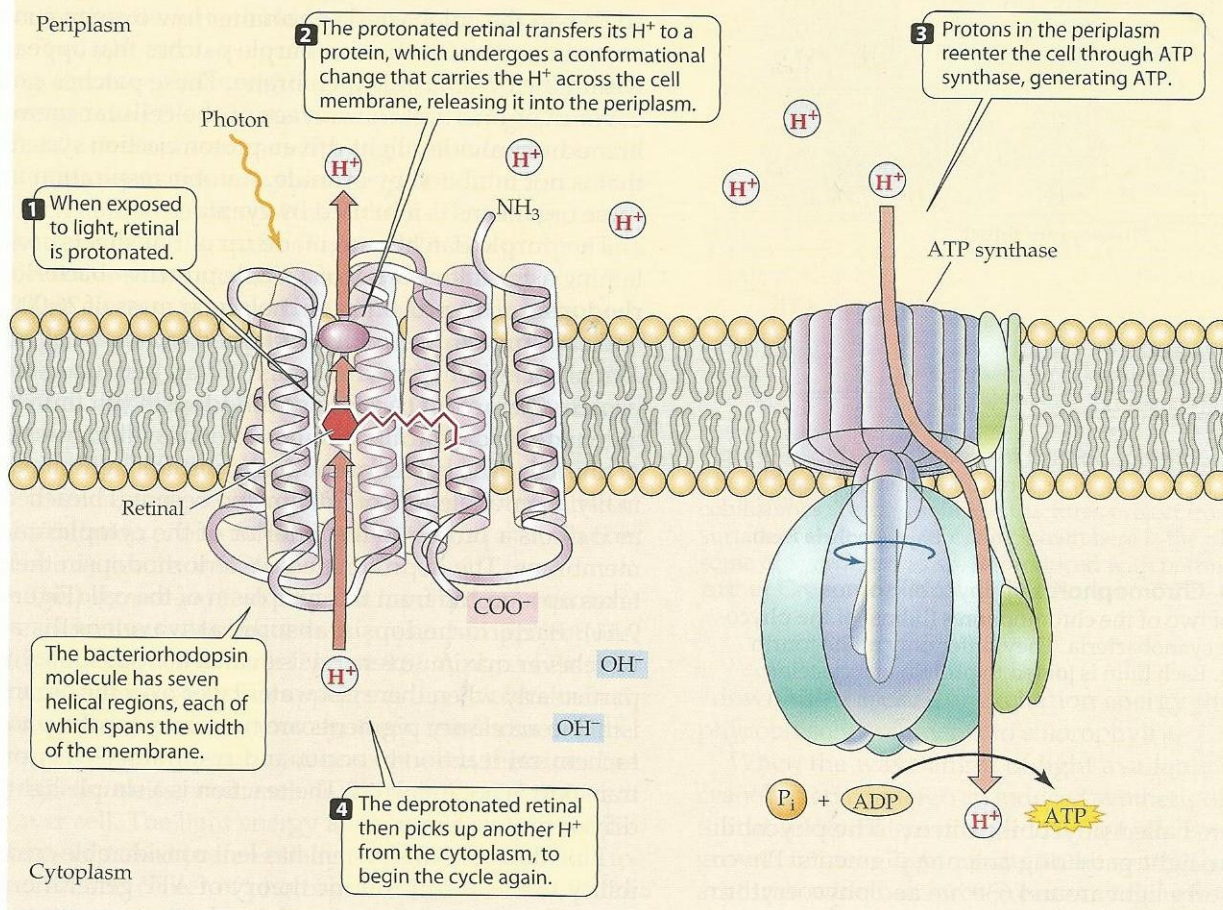
<http://phys.org/news/2011-03-neutron-analysis-yields-insight-bacteria.html>

Outside of cell



Φωτοσύνθεση στα **πορφυρά** μη θείο βακτήρια

Cytoplasm



3.2.7. Φωτοσύνθεση στο αρχαίο *Halobacterium salinarum*

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

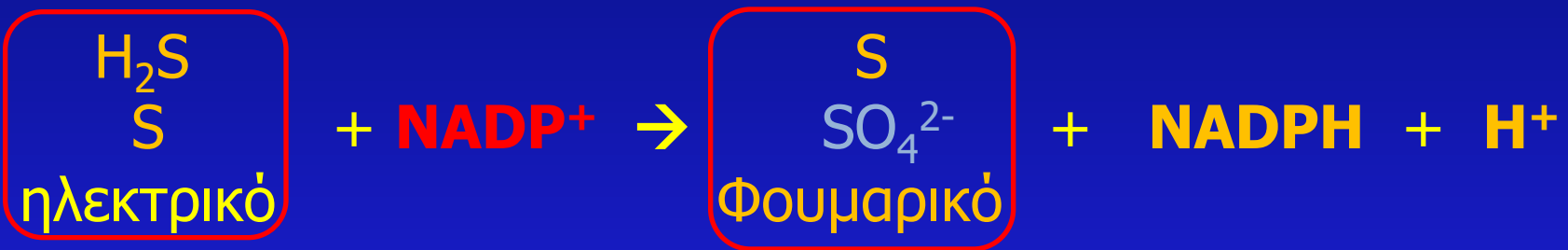
10

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.

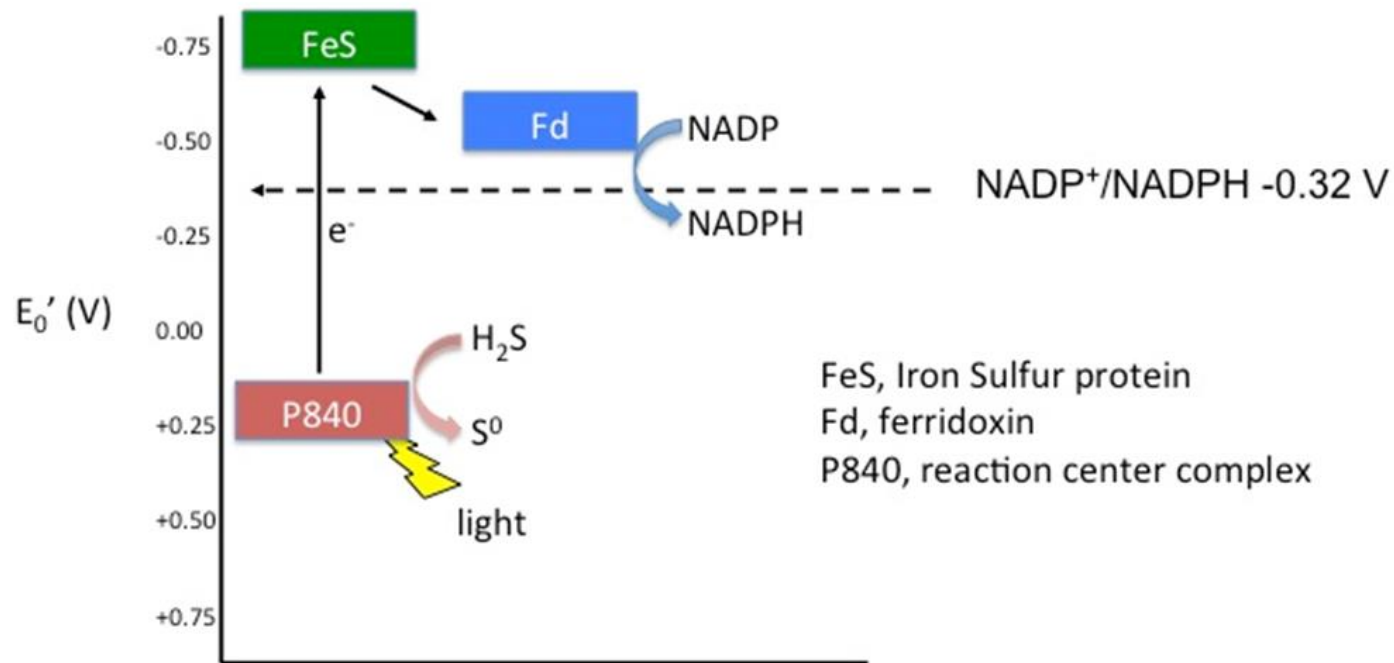
3.2.9. Σύνθεση του **NADPH** από τα φωτοσυνθετικά βακτήρια

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^-

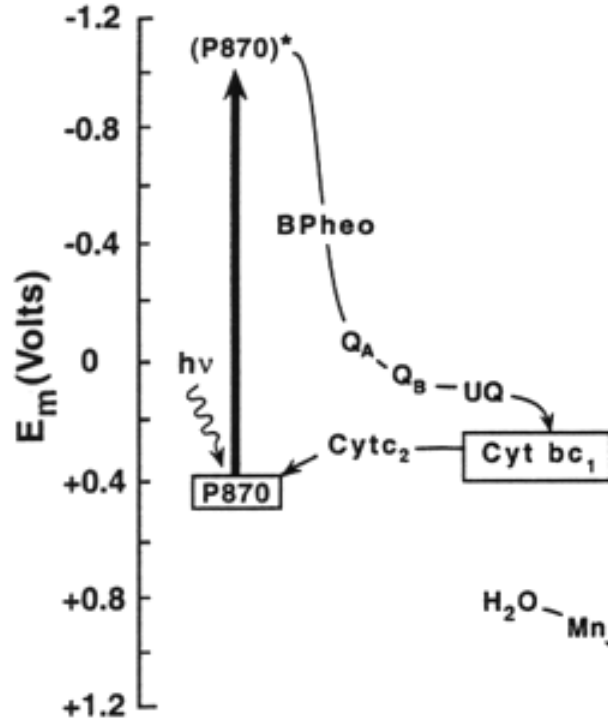
Μη κυκλική ροή ηλεκτρονίων στη ανοξική φωτοσύνθεση. Το κέντρο αντίδρασης P840 απορροφά την ενέργεια του φωτός και ενεργοποιείται. Το εκπεμπόμενο ηλεκτρόνιο ανάγει μια πρωτεΐνη πλειάδων FeS που με τη σειρά της ανάγει τη **φερρεδοξίνη**. Η ανηγμένη φερριδοξίνη (Fd_{red}) μπορεί τώρα να ανάγει το NADP⁺ προς NADPH. Τα ηλεκτρόνια πρέπει να αντικατασταθούν στο P840, κάτι που απαιτεί εξωτερικό δότη ηλεκτρονίων. Σε αυτό το παράδειγμα, το H₂S χρησιμεύει ως δότης ηλεκτρονίων. Δεν υπάρχει «**Z**» **φωτοσύνθεση** με ροή ηλεκτρονίων στα κυτοχρώματα.

[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

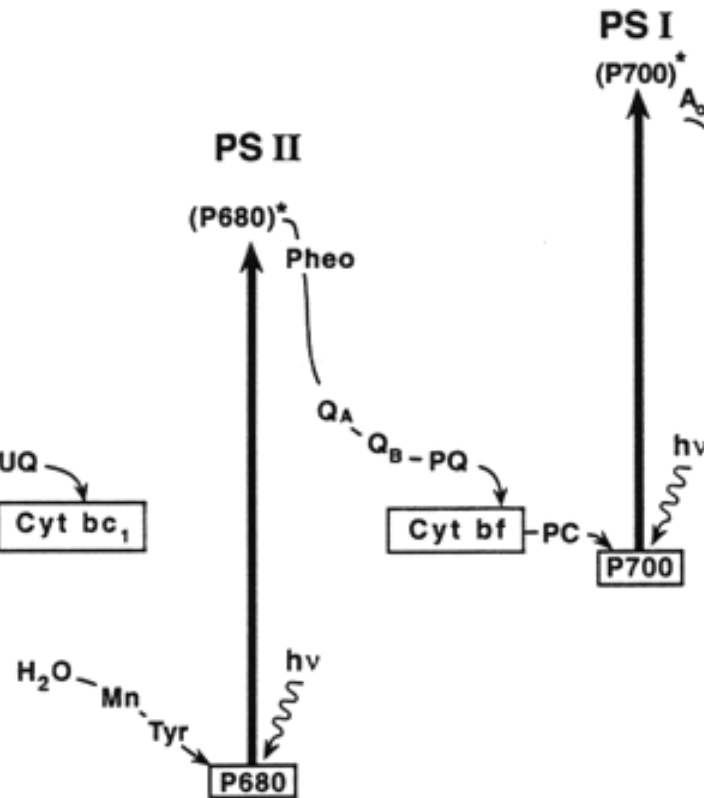
Pheophytin-Quinone Type Reaction Centers

Purple & Filamentous Green Bacteria



Κυκλική

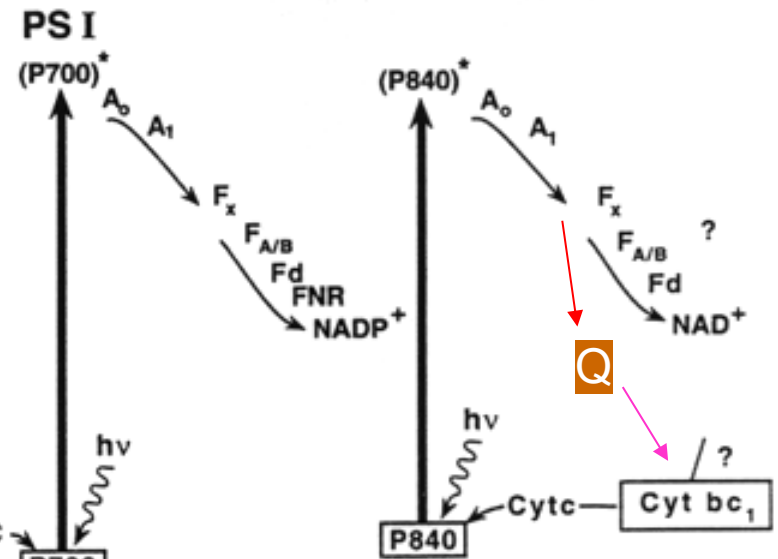
Plants, Algae and Cyanobacteria



«Z»

Iron-Sulfur Type Reaction Centers

Green Sulfur Bacteria & Heliobacteria



Μη κυκλική/Κυκλική

4. Διατροφικοί τύποι

4. Διατροφικοί τύποι

Ταξινόμηση των εμβίων με βάση:

Από πού παίρνουν **ενέργεια**;

Φως, ανόργανες ενώσεις, οργανικές ενώσεις

Από πού παίρνουν **άνθρακα**;

CO_2 , HCO_3^- (ανόργανος), οργανικές ενώσεις (οργανικός)

Table 27.1 Major Nutritional Modes

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

Παράδειγμα

1. Φυτά

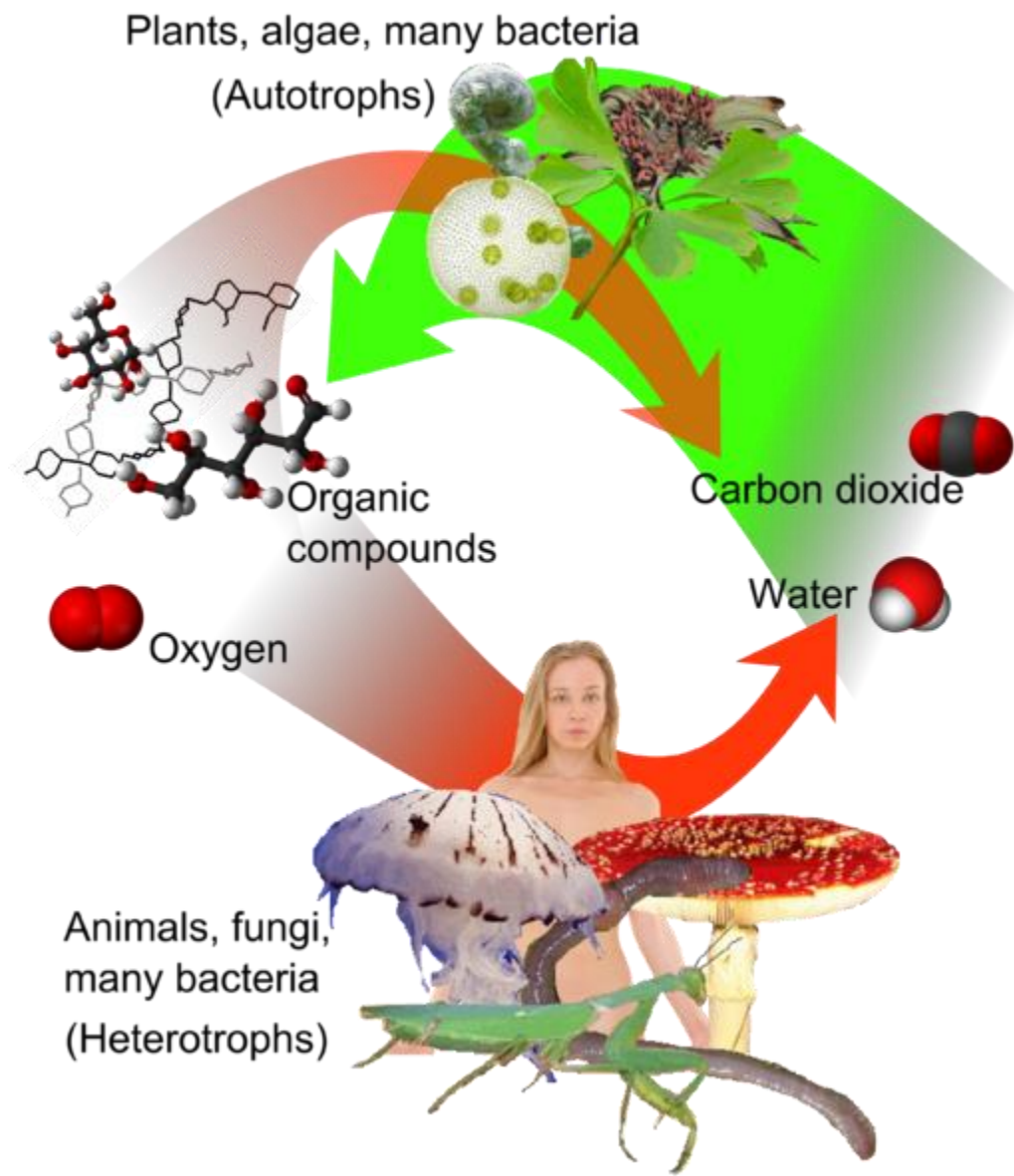
Ενέργεια από το φως (φωτο-)
Αφομοιώνουν ανόργανο C
(αυτότροφοι)

Φωτό-αυτότροφοι

2. Θηλαστικά (+μύκητες)

Οργανισμοί που λαμβάνουν
ενέργεια *και άνθρακα* από
οργανικές ενώσεις

Χημο-ετερότροφοι



ΤΕΛΟΣ