

# Εισαγωγικές έννοιες της Βιοχημείας του μεταβολισμού

- Το κύτταρο είναι η βασική μονάδα της ζωής.
- Σε ένα ιδιαίτερα μικρό όγκο  $10^{-8}$  έως  $10^{-12}$  cm<sup>3</sup> διευθετούνται μόρια ικανά να επιτελούν μια σειρά πορείες, οι οποίες το διατηρούν ζωντανό και εξασφαλίζουν τον πολλαπλασιασμό του.
- Από θερμοδυναμική άποψη το κύτταρο πρέπει να διατηρηθεί μακριά από την ισορροπία, ώστε να μπορεί να μεγαλώνει και να πολλαπλασιάζεται με τη βοήθεια ροής ενέργειας και υλικού που λαμβάνονται από το περιβάλλον.

## Τα ζωντανά κύτταρα πρέπει να είναι ικανά:

1. Να κατασκευάζουν τα δικά τους συστατικά από τα υλικά που υπάρχουν στο περιβάλλον τους.
2. Να προσλαμβάνουν ενέργεια από το περιβάλλον και να την μετατρέπουν σε διάφορες μορφές έργου που πρέπει να επιτελεστεί ώστε να εξασφαλισθεί η παραμονή τους στη ζωή.
3. Να καταλύουν πολλές χημικές αντιδράσεις οι οποίες είναι αναγκαίες για να υποστηριχθούν αυτές οι δραστηριότητες.
4. Να μεταδίδουν τις πληροφορίες για τις βιοσυνθετικές και λοιπές πορείες κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να εξασφαλίζεται η ακριβής αναπαραγωγή τους.
5. Να απομονώνονται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να έχουν ένα έλεγχο των ανταλλαγών με το εξωτερικό περιβάλλον.
6. Να ρυθμίζουν τις ενεργότητές τους ώστε να εξασφαλίζουν την προσαρμογή τους ανάλογα με τις μεταβολές που επισυμβαίνουν στο περιβάλλον.
7. Να πολλαπλασιάζονται.

# Βασικό ερώτημα

---

Ποιες είναι οι βιοχημικές αντιδράσεις που διατηρούν το κύτταρο στη ζωή;

ή

Ποιες είναι οι αναβολικές και οι καταβολικές διεργασίες που ικανοποιούν τις μεταβολικές ανάγκες ενός κυττάρου;

# Μεταβολισμός

- Η λέξη μεταβολισμός προέρχεται από την ελληνική λέξη “μεταβολή”.
- Ο μεταβολισμός (metabolism) αντιπροσωπεύει το άθροισμα των χημικών μεταβολών που μετατρέπουν τα θρεπτικά συστατικά (nutrients), δηλαδή τις “πρώτες ύλες” που είναι απαραίτητες για να συντηρηθούν οι ζωντανοί οργανισμοί, σε ενέργεια και στα χημικά σύνθετα τελικά προϊόντα των κυττάρων.
- Ο μεταβολισμός αποτελείται, στην κυριολεξία, από χιλιάδες ενζυμικές αντιδράσεις που είναι οργανωμένες σε διακριτά μονοπάτια. Αυτά τα μονοπάτια διεξάγονται σε βήματα, μετασχηματίζοντας τα υποστρώματα σε τελικά προϊόντα μέσω πολυάριθμων χημικών ενδιάμεσων (intermediates).
- Ο μεταβολισμός αναφέρεται ορισμένες φορές ως ενδιάμεσος μεταβολισμός, ένας όρος που αντανακλά αυτή τη διαδικασία.

- Είναι ίδιος ο μεταβολισμός σε διαφορετικούς οργανισμούς;
- Τι γνώση μπορεί να αποκτηθεί από τους μεταβολικούς χάρτες;
- Πώς οι αναβολικές και οι καταβολικές διεργασίες σχηματίζουν τον πυρήνα των μεταβολικών μονοπατιών;
- Τι πειράματα μπορούν να γίνουν για τη διαλεύκανση των μεταβολικών μονοπατιών;
- Τι μας λέει το μεταβόλομα για ένα βιολογικό σύστημα;
- Ποια συστατικά των τροφών αποτελούν τη βάση της διατροφής του ανθρώπου;

Είναι ίδιος ο μεταβολισμός σε διαφορετικούς οργανισμούς;



Οι διαφορετικές μορφολογίες των διαφόρων οργανισμών ίσως παραπέμπουν στο συμπέρασμα ότι δεν έχουν τίποτε κοινό μεταξύ τους.

- Οι οργανισμοί επιδεικνύουν αξιοσημείωτη ομοιότητα στα κύρια μεταβολικά τους μονοπάτια
- Αυτό το δεδομένο αποτελεί απόδειξη ότι όλες οι μορφές ζωής προέρχονται από μία κοινή προγονική μορφή
- Κι όμως, τα ζωντανά πλάσματα επιδεικνύουν μεταβολική ποικιλομορφία
- Το οξυγόνο για παράδειγμα είναι απαραίτητο για τους αερόβιους οργανισμούς, αλλά οι υποχρεωτικά αναερόβιοι οργανισμοί δηλητηριάζονται από το οξυγόνο
- Η ροή της ενέργειας στη βιόσφαιρα και οι κύκλοι του άνθρακα και του οξυγόνου είναι στενά συνδεδεμένοι
- Η ώθηση γι' αυτούς τους κύκλους είναι η ηλιακή ενέργεια

Οι οργανισμοί ανάλογα με **το είδος της πηγής ενέργειας** την οποία χρησιμοποιούν κατατάσσονται σε:

- **Φωτότροφους, ή αυτότροφους** οι οποίοι μετατρέπουν την ενέργεια του ηλιακού φωτός σε χημικά χρήσιμη μορφή.
- **Χημειότροφους ή ετερότροφους** οι οποίοι προσλαμβάνουν τα θρεπτικά μόρια από το περιβάλλον, τα οποία στη συνέχεια οξειδώνουν παράγοντας χρήσιμη ενέργεια.





Μεταβολική ταξινόμηση των οργανισμών με βάση τις ανάγκες τους για άνθρακα και ενέργεια.

Οι αυτότροφοι χρησιμοποιούν  $\text{CO}_2$ · οι ετερότροφοι χρησιμοποιούν οργανικό άνθρακα

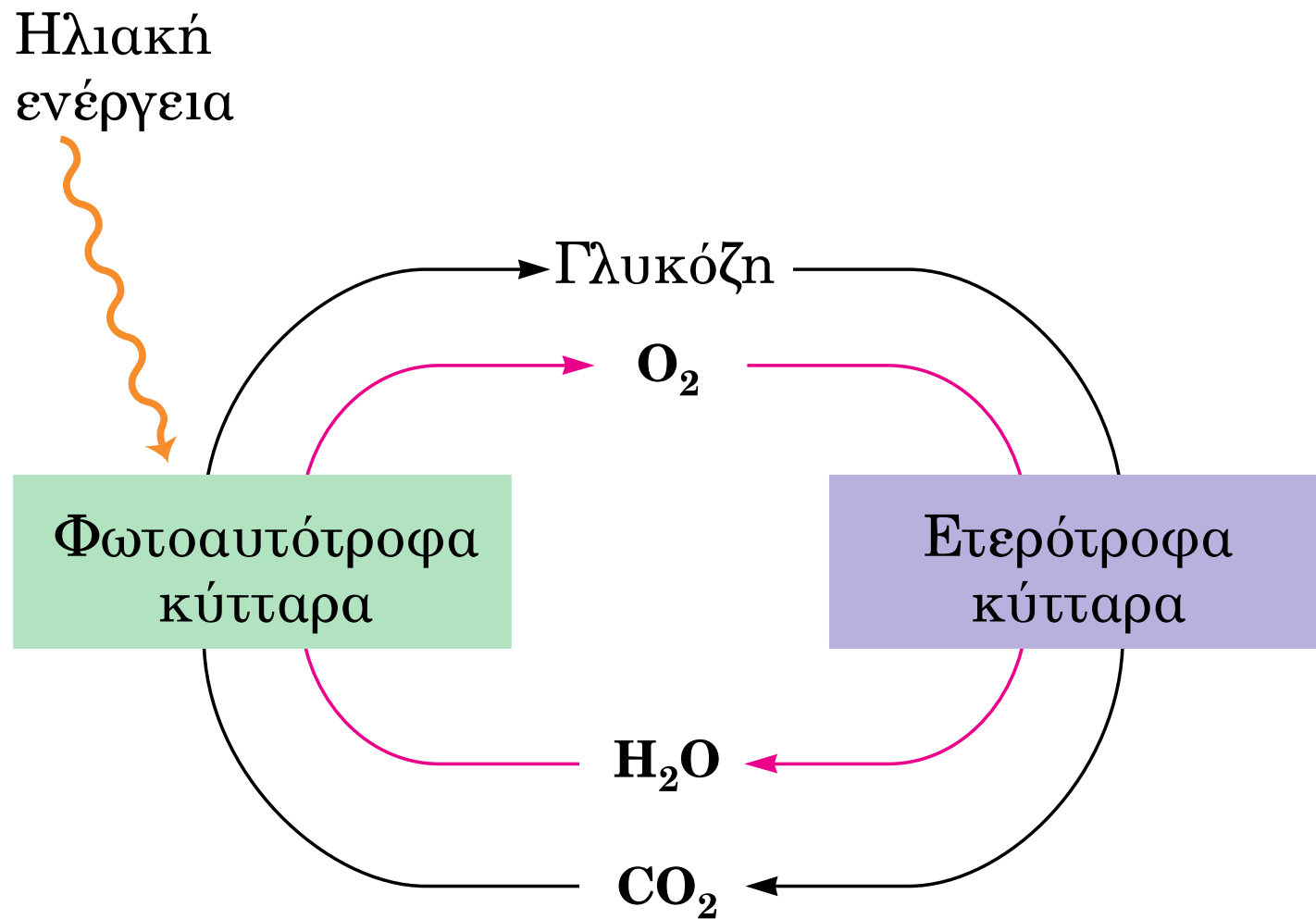
οι φωτότροφοι χρησιμοποιούν το φως· οι χημειότροφοι χρησιμοποιούν οργανικούς και ανόργανους δότες ηλεκτρονίων.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 17.1**

Μεταβολική ταξινόμηση των οργανισμών με βάση τις ανάγκες τους για άνθρακα και ενέργεια

Ταξινόμηση	Πηγή άνθρακα	Πηγή ενέργειας	Δότες ηλεκτρονίων	Παραδείγματα
Φωτοαυτότροφα	$\text{CO}_2$	Φως	$\text{H}_2\text{O}$ , $\text{H}_2\text{S}$ , S, άλλες ανόργανες ενώσεις	Φυτά, φύκη, κυανοβακτήρια, φωτοσυνθετικά βακτήρια
Φωτοετερότροφα	Οργανικές ενώσεις	Φως	Οργανικές ενώσεις	Μη θειούχα ροδοβακτήρια
Χημειοαυτότροφα	$\text{CO}_2$	Οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις	Ανόργανες ενώσεις: $\text{H}_2$ , $\text{H}_2\text{S}$ , $\text{NH}_4^+$ , $\text{NO}_2^-$ , $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Mn}^{2+}$	Νιτροποιητικά βακτήρια, υδρογόνο, θείο, και σιδηροβακτήρια
Χημειοετερότροφα	Οργανικές ενώσεις	Οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις	Οργανικές ενώσεις (π.χ. γλυκόζη)	Όλα τα ζώα, οι περισσότεροι μικροοργανισμοί, μη-φωτοσυνθετικοί ιστοί φυτών π.χ. οι ρίζες, φωτοσυνθετικά κύτταρα στο σκοτάδι.

# Ο ήλιος είναι ενέργεια για τη ζωή



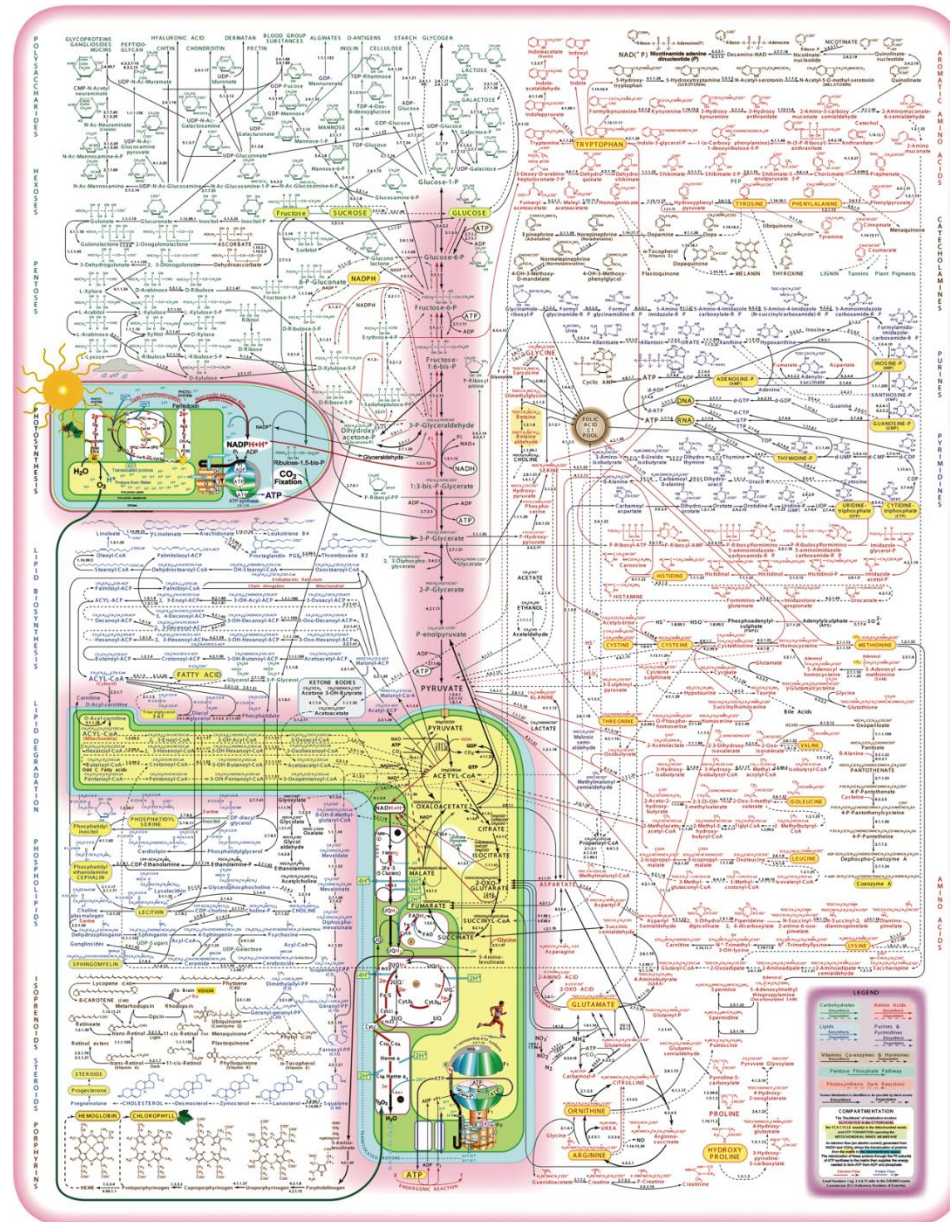
Η ροή της ενέργειας στη βιόσφαιρα είναι συζευγμένη με τους κύκλους του άνθρακα και του οξυγόνου.

# Τι μπορούμε να μάθουμε από τους μεταβολικούς χάρτες;

- Ο μεταβολισμός συνίσταται στον καταβολισμό και τον αναβολισμό
- **Καταβολισμός: μονοπάτια αποικοδόμησης**
  - Συνήθως αποδίδεται ενέργεια
- **Αναβολισμός: μονοπάτια βιοσύνθεσης**
  - Συνήθως απαιτείται ενέργεια
- Οι μεταβολικοί χάρτες απεικονίζουν τις κύριες αντιδράσεις του ενδιάμεσου μεταβολισμού
- Όταν οι κύριες μεταβολικές οδοί είναι γνωστές και οι λειτουργίες τους είναι κατανοητές, οι χάρτες είναι εύκολο να ακολουθηθούν, παρά την πολυπλοκότητά τους

# Ένας μεταβολικός χάρτης

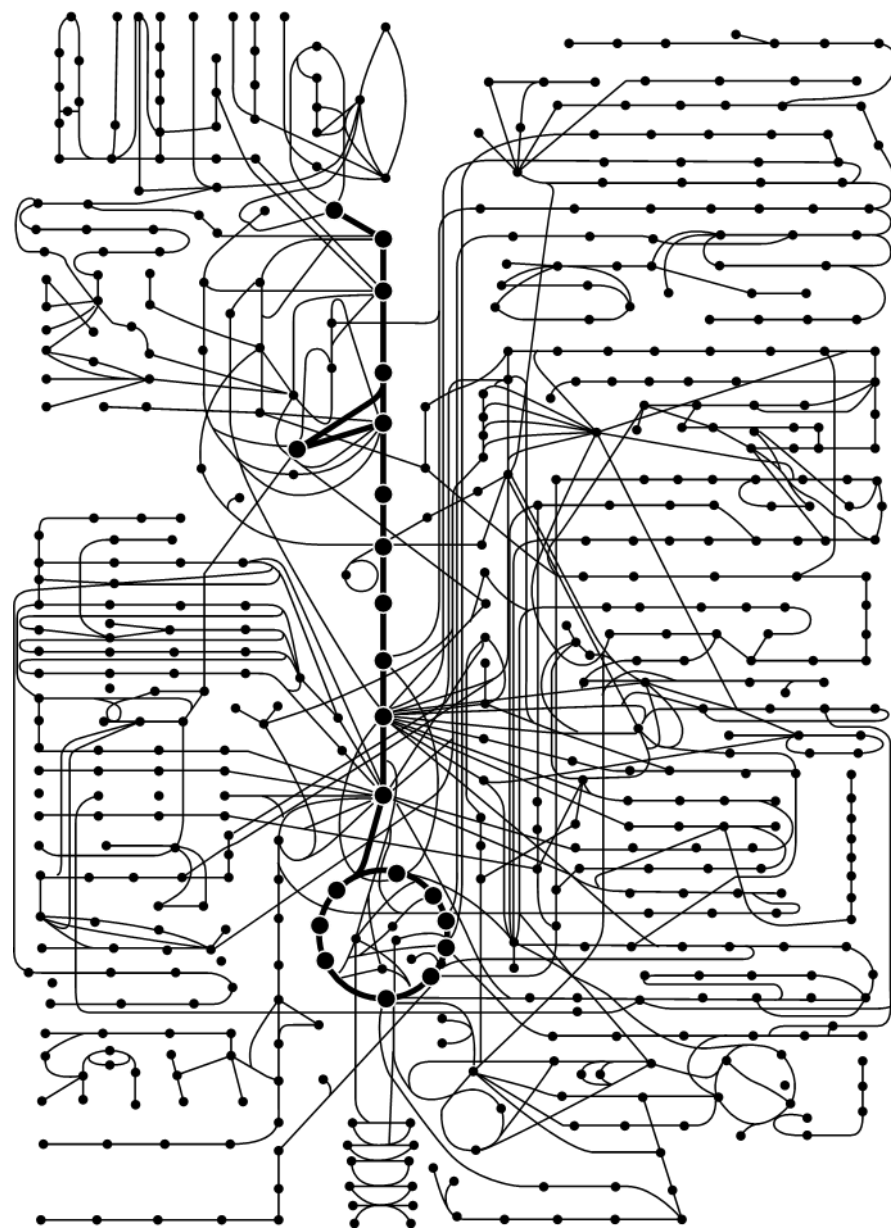
Στον χάρτη αντιπροσωπεύονται περισσότερες από 500 διαφορετικές ενδιάμεσες χημικές ενώσεις, ή μεταβολίτες, και ένας μεγαλύτερος αριθμός ενζύμων.



Ένας ενδιαφέρων μετασχηματισμός του μεταβολικού χάρτη αντιπροσωπεύει κάθε ενδιάμεσο μεταβολίτη ως μαύρη κουκκίδα και κάθε ένζυμο ως γραμμή. Κατ' αυτόν τον τρόπο, περισσότερα από χίλια ένζυμα και υποστρώματα αντιπροσωπεύονται από μόλις δύο σύμβολα.

Μία κουκκίδα συνδεδεμένη με μία γραμμή πρέπει να είναι μια θρεπτική ουσία, μια μορφή προς αποθήκευση, ένα τελικό προϊόν ή ένα εκκρινόμενο προϊόν. Μία κουκκίδα συνδεδεμένη με μόλις δύο γραμμές είναι πιθανώς ένας ενδιάμεσος μεταβολίτης σε ένα μονοπάτι και έχει μόνο μία μεταβολική τύχη.

Μία κουκκίδα συνδεδεμένη με τρεις γραμμές αντιπροσωπεύει έναν ενδιάμεσο μεταβολίτη ο οποίος μπορεί να ακολουθήσει δύο μεταβολικές πορείες.



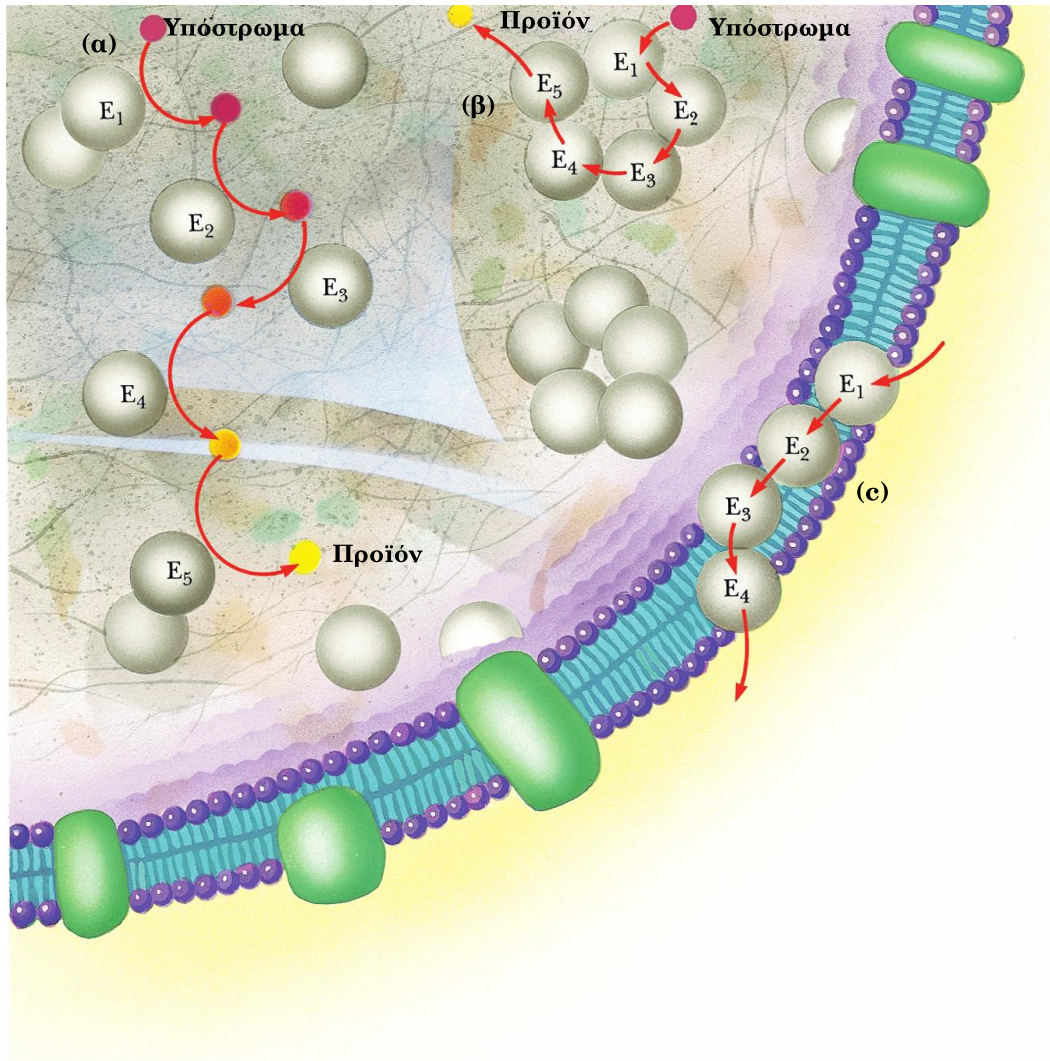


# Οργάνωση σε μονοπάτια

---

- Τα μονοπάτια αποτελούνται από διαδοχικά βήματα
- Τα ένζυμα μπορεί να είναι ξεχωριστά
- Ή μπορεί να σχηματίζουν ένα πολυενζυμικό σύμπλοκο
- Ή μπορεί να είναι ένα σύστημα συνδεδεμένο στη μεμβράνη
- Νέα ερευνητικά ευρήματα υποστηρίζουν ότι τα πολυενζυμικά σύμπλοκα είναι πιο συνήθη απ' ό,τι θεωρούνταν κατά το παρελθόν

# Τα πολυενζυμικά συστήματα μπορούν να λάβουν διαφορετικές μορφές



(α) Φυσικά μεμονωμένα, διαλυτά ένζυμα με διαχεόμενους ενδιάμεσους μεταβολίτες.

(β) Ένα πολυενζυμικό σύμπλοκο. Το υπόστρωμα εισέρχεται στο σύμπλοκο, δεσμεύεται και σταδιακά τροποποιείται από τα ένζυμα E<sub>1</sub> έως E<sub>5</sub>. Κανένας ενδιάμεσος μεταβολίτης δεν είναι ελεύθερος να διαχυθεί.

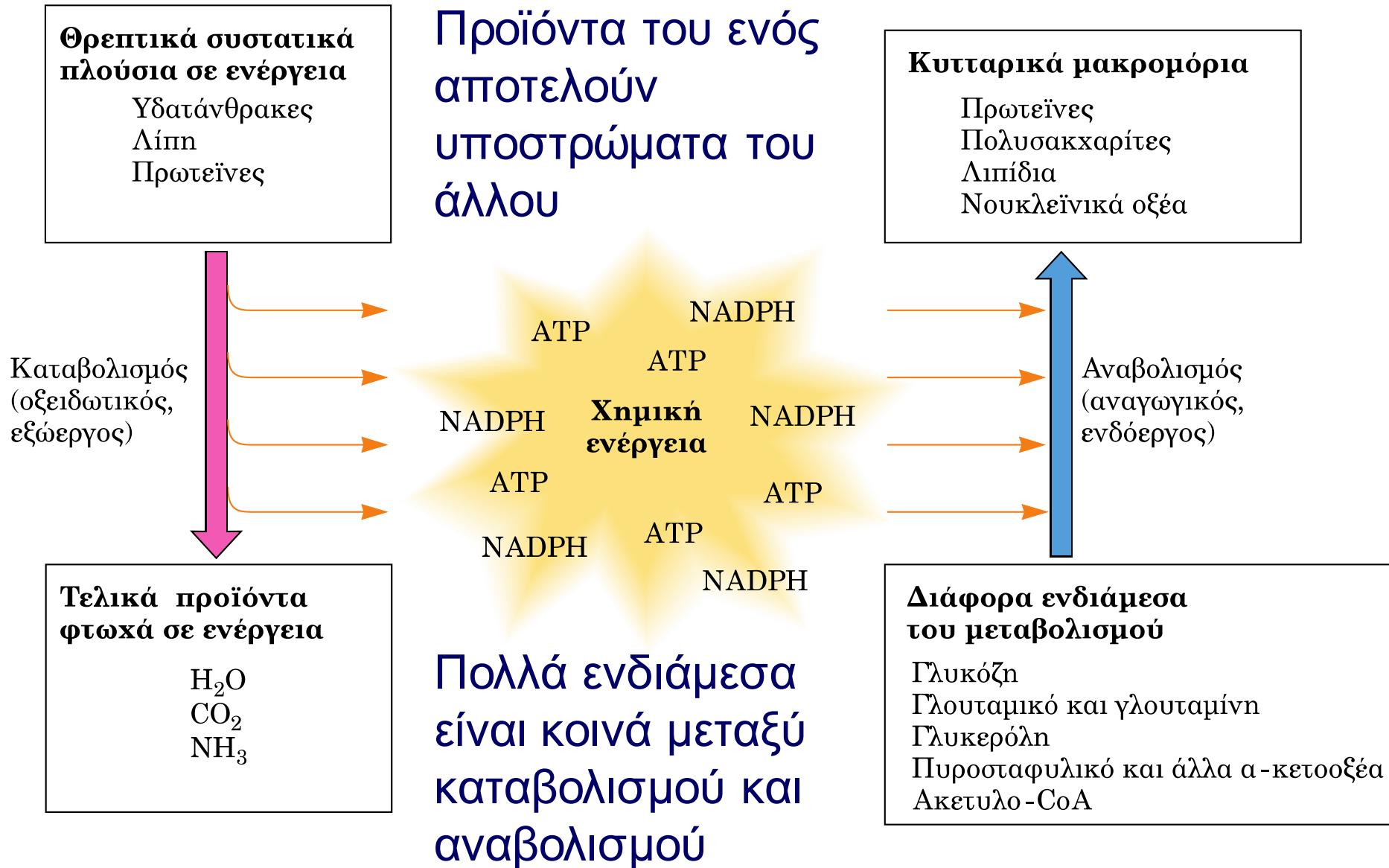
(γ) Ένα πολυενζυμικό σύστημα προσδεμένο στη μεμβράνη.

Πώς σχηματίζουν τον πυρήνα των μεταβολικών μονοπατιών οι αναβολικές και οι καταβολικές διεργασίες;

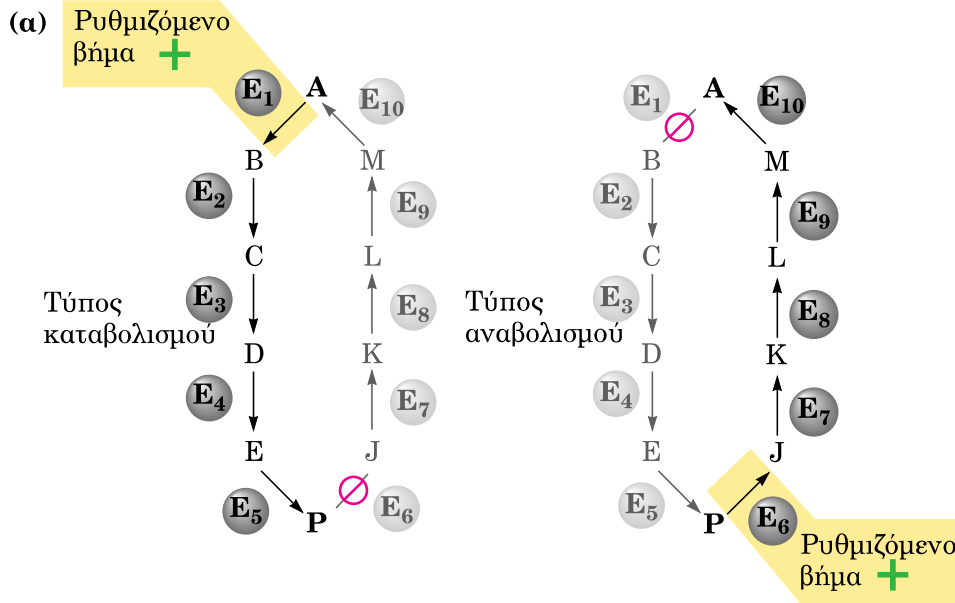
- Τα καταβολικά μονοπάτια παράγουν ενέργεια
- Τα αναβολικά μονοπάτια απαιτούν ενέργεια
- Ο καταβολισμός περιλαμβάνει την οξειδωτική αποικοδόμηση σύνθετων θρεπτικών μορίων
- Ο αναβολισμός είναι μια συνθετική διαδικασία στην οποία τα ποικίλα και πολύπλοκα βιομόρια συναρμολογούνται από απλούστερες πρόδρομες ενώσεις



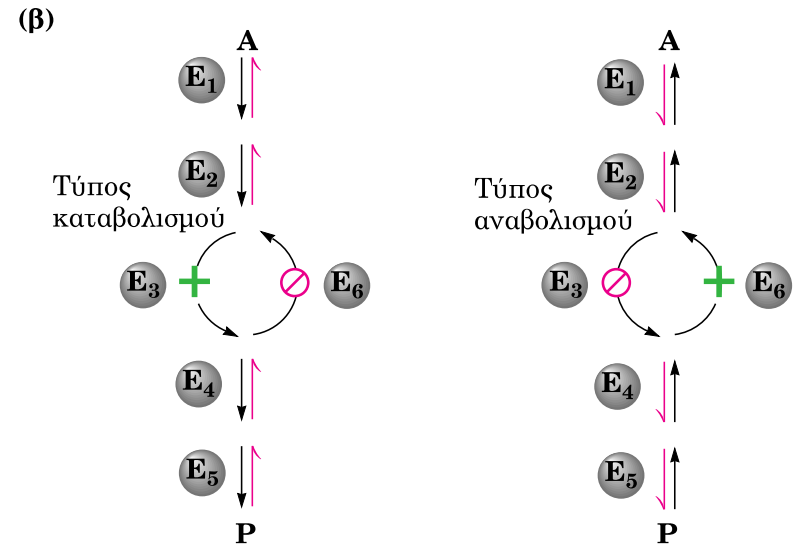
# Ο αναβολισμός και ο καταβολισμός είναι αλληλένδετοι



# Η μεταβολική ρύθμιση απαιτεί ξεχωριστά μονοπάτια για αντίστροφες μεταβολικές πορείες



Η ενεργοποίηση του ενός τύπου συνοδεύεται από την αναστολή του άλλου τύπου.



Τα παράλληλα μονοπάτια του καταβολισμού και του αναβολισμού πρέπει να διαφέρουν σε ένα τουλάχιστο μεταβολικό βήμα έτσι ώστε να μπορούν να ρυθμίζονται ανεξάρτητα.

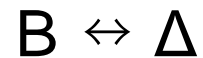
(α) Οι παράλληλες ακολουθίες μπορεί να εξελίσσονται μέσω ανεξάρτητων οδών.

(β) Μόνο μία αντίδραση καταλύεται από δύο διαφορετικά ένζυμα.

Η ολική μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας για μια σειρά συζευγμένων αντιδράσεων ισούται με το άθροισμα των επιμέρους μεταβολών ελεύθερης ενέργειας.



$$\Delta G^{\circ'} = +5 \text{ kcal/mol}$$



$$\Delta G^{\circ'} = -8 \text{ kcal/mol}$$

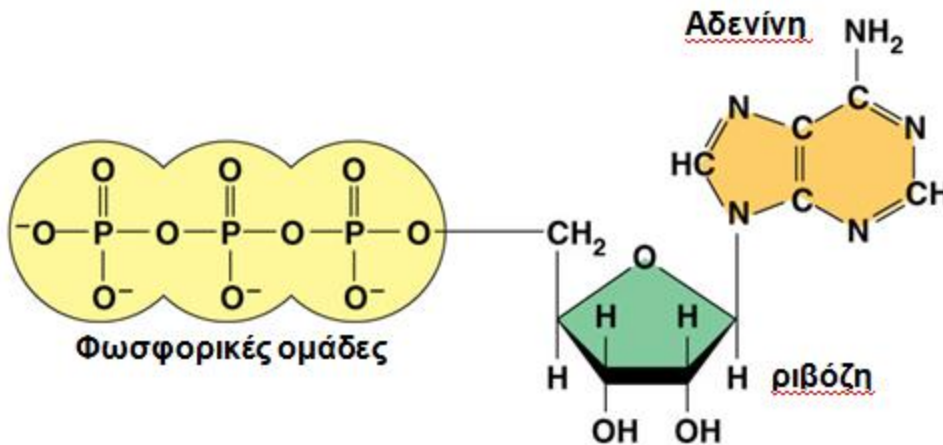


$$\Delta G^{\circ'} = -3 \text{ kcal/mol}$$

Κάτω από πρότυπες συνθήκες, η ένωση A δεν μπορεί να μετατραπεί αυθόρμητα στις B και Γ, ενώ η μετατροπή του B σε Δ είναι θερμοδυναμικά εφικτή. Επειδή οι μεταβολές της ελεύθερης ενέργειας είναι προσθετικές, η μετατροπή της A σε Γ και Δ είναι δυνατόν να λάβει χώρα αυθόρμητα κάτω από πρότυπες συνθήκες αφού έχει  $\Delta G^{\circ'}$  αρνητικό (-3 kcal/mol).

*Επομένως, μια αντίδραση θερμοδυναμικά ευνοούμενη είναι δυνατόν να ωθήσει μια αντίδραση θερμοδυναμικά με ευνοούμενη, με την οποία είναι συζευγμένη.*

Στα ζωντανά κύτταρα η ουσία η οποία λειτουργεί ως διασυνδετήρια ουσία μεταξύ εξώθερμων και ενδόθερμων αντιδράσεων στις περισσότερες περιπτώσεις είναι το ATP.

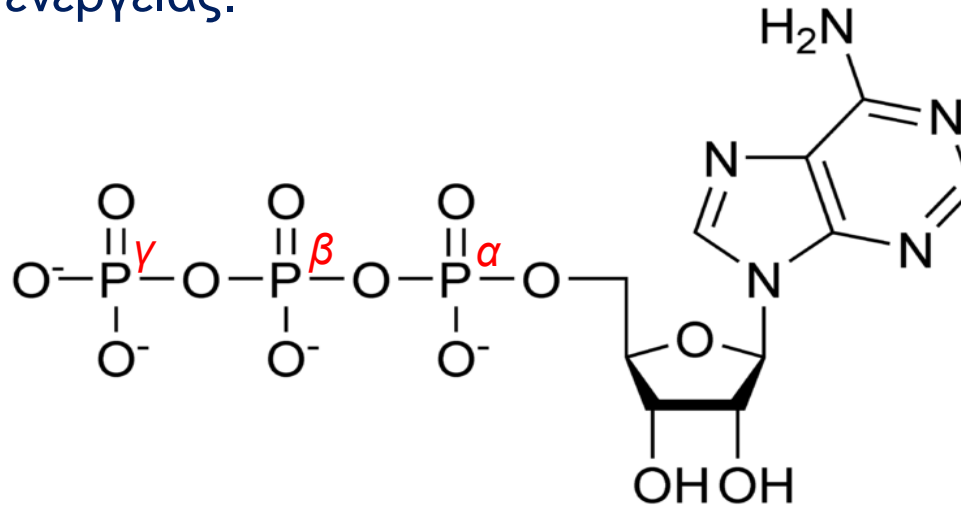


Δομή της τριφωσφορικής αδενοσίνης ATP

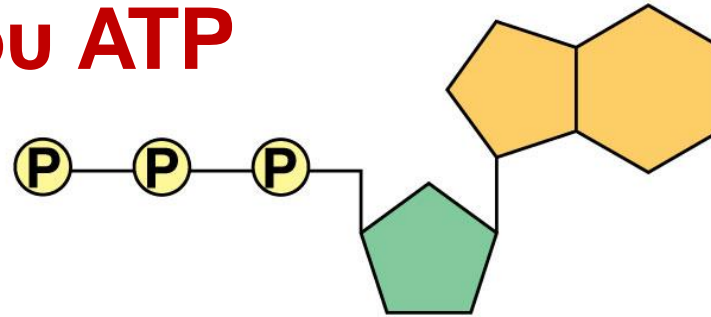
Χαρακτηρίζεται ως ένωση υψηλής ενεργείας διότι παρουσιάζει μια μεγάλη ελάττωση στην ελεύθερη ενέργεια όταν υφίσταται υδρολυτικές αντιδράσεις.

## Χαρακτηριστικά του ATP

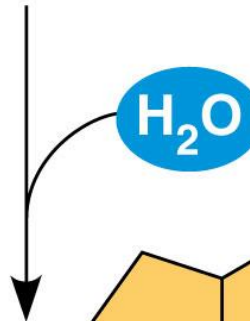
- Είναι συνήθως ένωση ασταθής στο άλκαλι και στην θερμότητα.
- Φέρει ένα καθαρά αρνητικό φορτίο -4 ως συνέπεια του γεγονότος ότι τα δυο διϊστάμενα πρωτόνια στους εσωτερικούς φωσφόρους του ATP έχουν  $pK_a$  στην περιοχή 2-3, ενώ η τελική ομάδα έχει ένα πρωτόνιο με  $pK_a$  2-3 και ένα δεύτερο με  $pK_a$  6,5.
- Η υδρόλυση του ATP απελευθερώνει μια μεγάλη ποσότητα ελεύθερης ενέργειας.



# Υδρόλυση του ATP

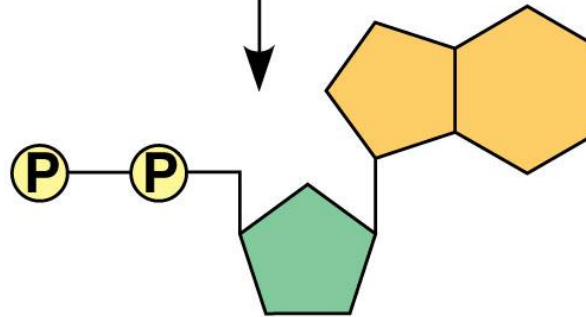


Τριφωσφορική αδενοσίνη (ATP)



$\text{P}_i$   
Ανόργανο  
φωσφορικό

+



+

**Ενέργεια**

Η ενέργεια αυτή  
χρησιμοποιείται  
για να ωθήσει τις  
αντιδράσεις που  
χρειάζονται  
ελεύθερη ενέργεια.

Διφωσφορική αδενοσίνη (ADP)

Το ATP μπορεί να υδρολυθεί με διάφορους τρόπους.

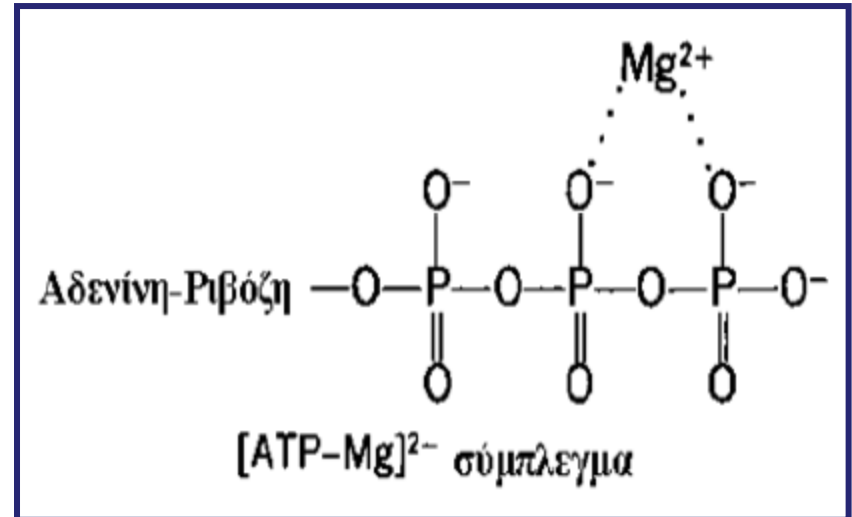


$$\Delta G^{\circ'} = - 7,3 \text{ kcal/mol}$$

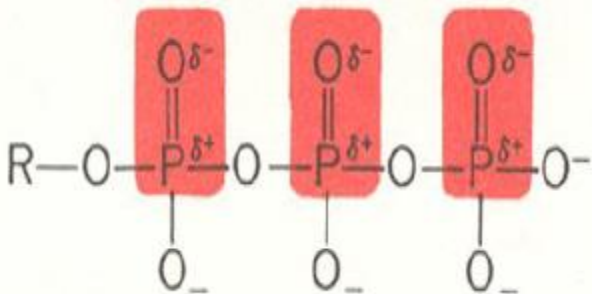


$$\Delta G^{\circ'} = - 10,9 \text{ kcal/mol}$$

Η ακριβής τιμή της  $\Delta G$  των αντιδράσεων αυτών εξαρτάται από την ιονική ισχύ του μέσου και από τις συγκεντρώσεις των ιόντων  $\text{Mg}^{2+}$ . Κάτω από τυπικές κυτταρικές συνθήκες, η πραγματική τιμή των αντιδράσεων αυτών είναι περίπου  $- 12 \text{ kcal/mol}$ .



## Μηχανισμός με τον οποίο ερμηνεύεται η σημαντική αρνητική μεταβολή στην ελεύθερη ενέργεια κατά την υδρόλυση του ATP



- Στον δεσμό  $P=O$  υπάρχει τάση των ηλεκτρονίων του φωσφόρου να σύρονται προς το άτομο του ηλεκτραρνητικού οξυγόνου με συνέπεια να δημιουργείται μερικά αρνητικό φορτίο ( $\delta^-$ ).
- Το αρνητικό φορτίο αντirroπείται από ένα θετικό που διαμορφώνεται στο άτομο του P που τελικά οδηγεί σε μια πόλωση του δεσμού φωσφόρου οξυγόνου.
- Η διατήρηση των θετικά φορτισμένων φωσφόρων ο ένας δίπλα στον άλλο, παρά τις απωστικές δυνάμεις, υποδηλώνει ότι τα μόρια αυτά περιέχουν αρκετή εσωτερική ενέργεια.
- Όταν η δομή του πυροφωσφόρου διασπαστεί, όπως π.χ κατά την υδρόλυση, αυτή η ενέργεια απελευθερώνεται.



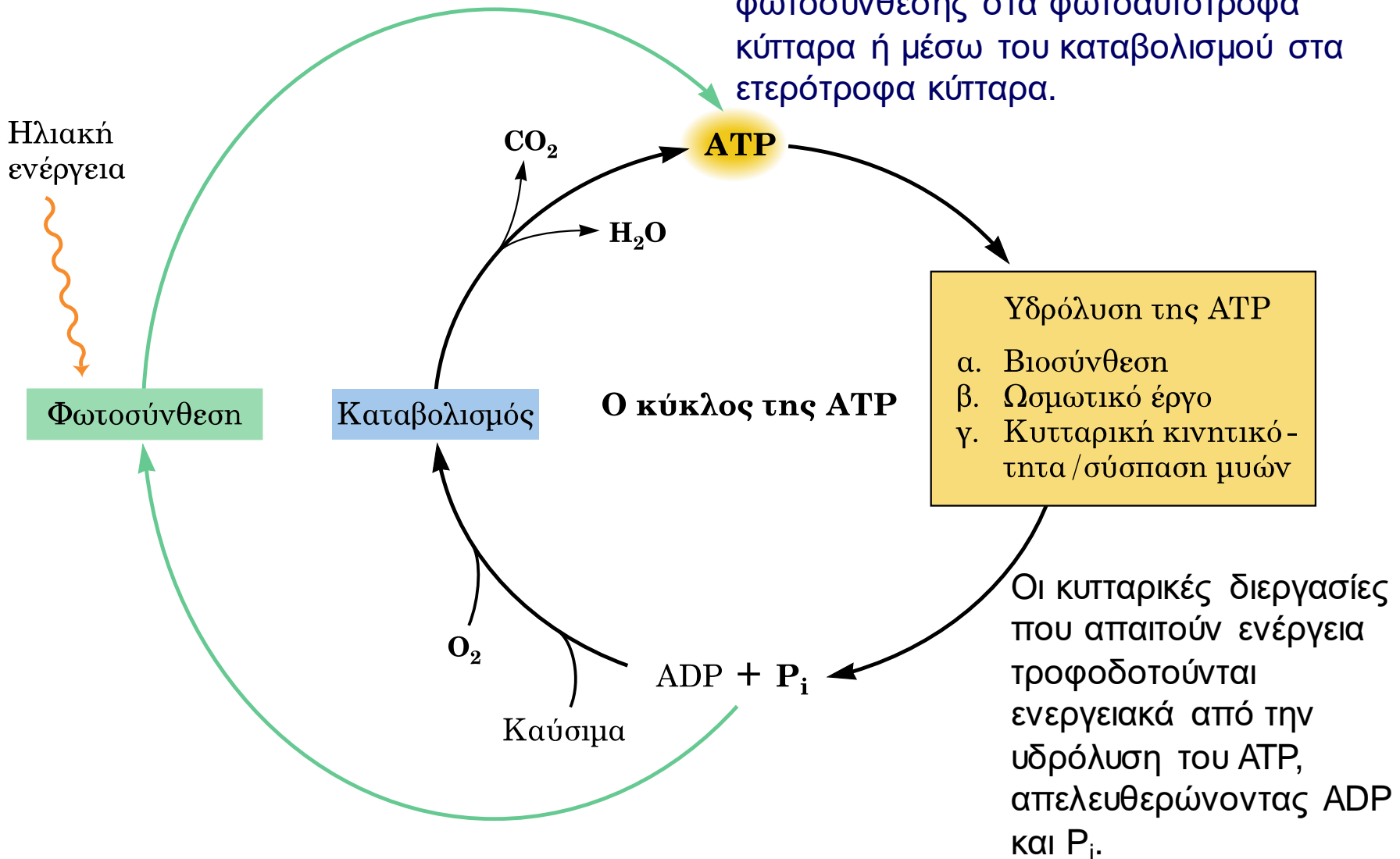
Το ATP χρησιμεύει ως ο *κύριος άμεσος δότης ελεύθερης* ενέργειας σε βιολογικά συστήματα και όχι ως μορφή μακρόχρονης εναποθήκευσης.

- Σ' ένα τυπικό κύτταρο, ένα μόριο ATP καταναλώνεται σ' ένα λεπτό από το σχηματισμό του.
- Ένας άνθρωπος σε ανάπαυση καταναλώνει περίπου 40 kg ATP σε 24 ώρες.
- Σε καταστάσεις καταπόνησης, ο ρυθμός κατανάλωσης ATP φθάνει ακόμα και το 0,5 kg / λεπτό.

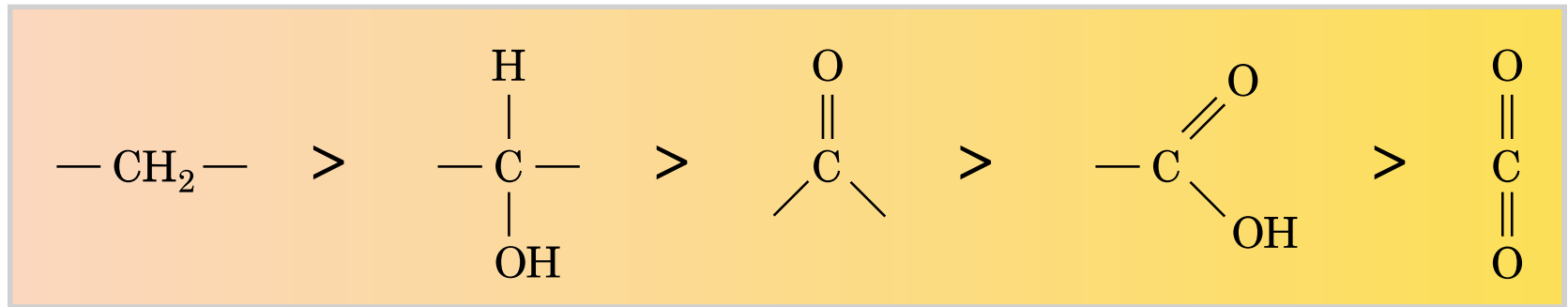
Δεδομένου ότι η συνολική ποσότητα του ATP στο σώμα μας είναι περίπου 100 g, *ο ρυθμός μετατροπής αυτής της μικρής ποσότητας ATP είναι πολύ υψηλός.*

# Ο κύκλος του ATP στα κύτταρα

Το ATP σχηματίζεται μέσω της φωτοσύνθεσης στα φωτοαυτότροφα κύτταρα ή μέσω του καταβολισμού στα ετερότροφα κύτταρα.



# Τα υποστρώματα του καταβολισμού περιέχουν σχετικά ανηγμένες μορφές άνθρακα



Πιο ανηγμένη  
κατάσταση

Πιο οξειδωμένη  
κατάσταση

Σύγκριση της κατάστασης αναγωγής των ατόμων του άνθρακα στα βιομόρια. Οι αλυσίδες των ομάδων  $\text{—CH}_2\text{—}$  είναι η πιο πλούσια σε ενέργεια μορφή ανηγμένου άνθρακα στη βιόσφαιρα. Το διοξείδιο του άνθρακα είναι το τελικό προϊόν του καταβολισμού και η πιο οξειδωμένη μορφή του άνθρακα στη βιόσφαιρα.

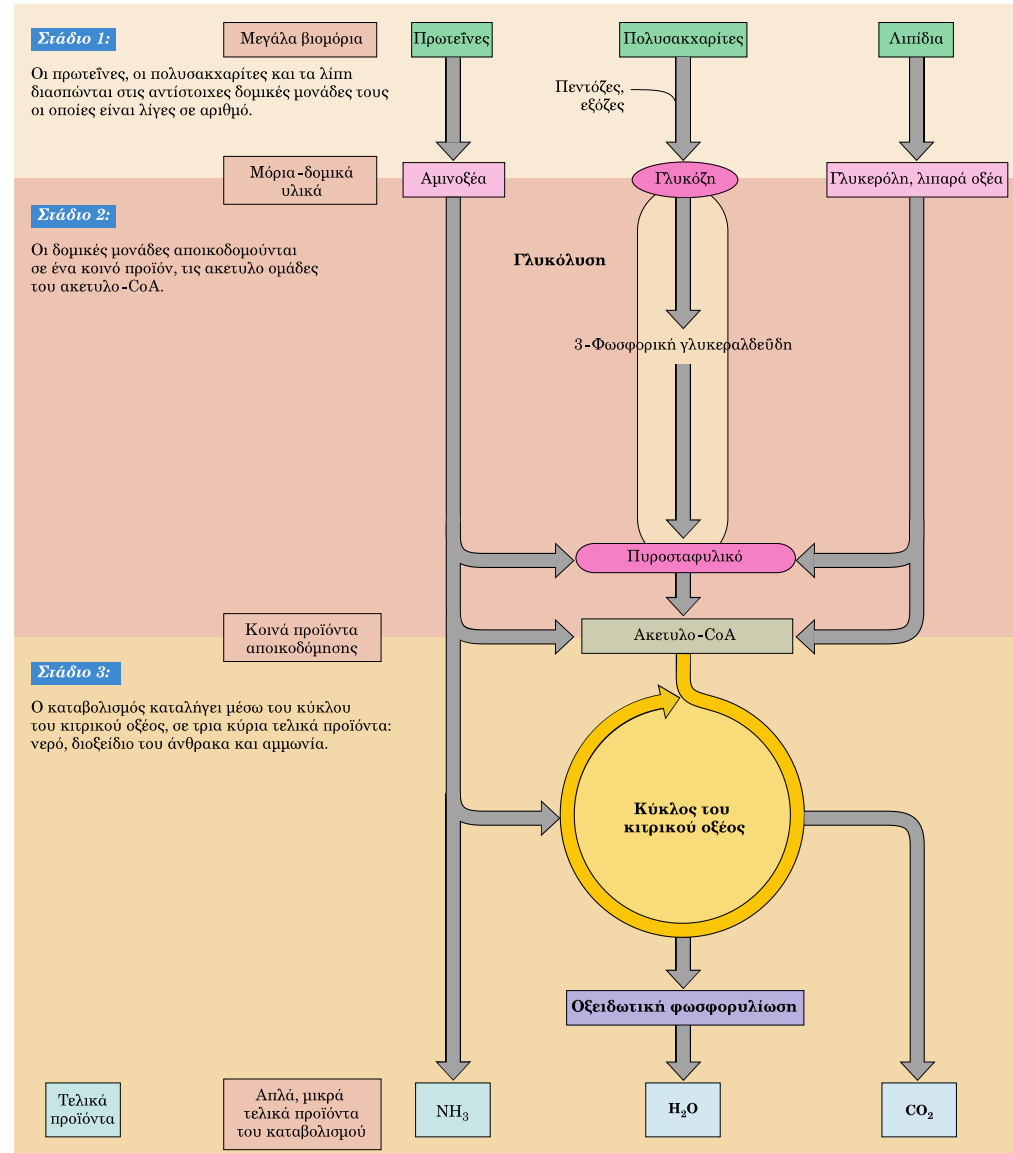
Η οξείδωση των καύσιμων μορίων π.χ. σάκχαρα, λίπη, πρωτεΐνες, στους αερόβιους οργανισμούς δεν γίνεται σε μια απευθείας αντίδραση με το  $O_2$ , αλλά σε τρία κύρια στάδια.

# Τα μονοπάτια του καταβολισμού συγκλίνουν σε λίγα τελικά προϊόντα

**Στάδιο 1:** οι πρωτεΐνες, οι πολυσακχαρίτες και τα λιπίδια διασπώνται στα δομικά του συστατικά.

**Στάδιο 2:** Τα δομικά συστατικά αποικοδομούνται σε κοινό προϊόν, τις ακετυλομάδες του ακετυλο-CoA.

**Στάδιο 3:** Ο καταβολισμός συγκλίνει σε τρία κύρια τελικά προϊόντα: νερό, διοξείδιο του άνθρακα και αμμωνία.



Για τη μεταφορά  
διαφόρων ομάδων ή και ηλεκτρονίων  
κατά τις αντιδράσεις του μεταβολισμού  
χρησιμοποιούνται **ενεργοποιημένοι φορείς**.

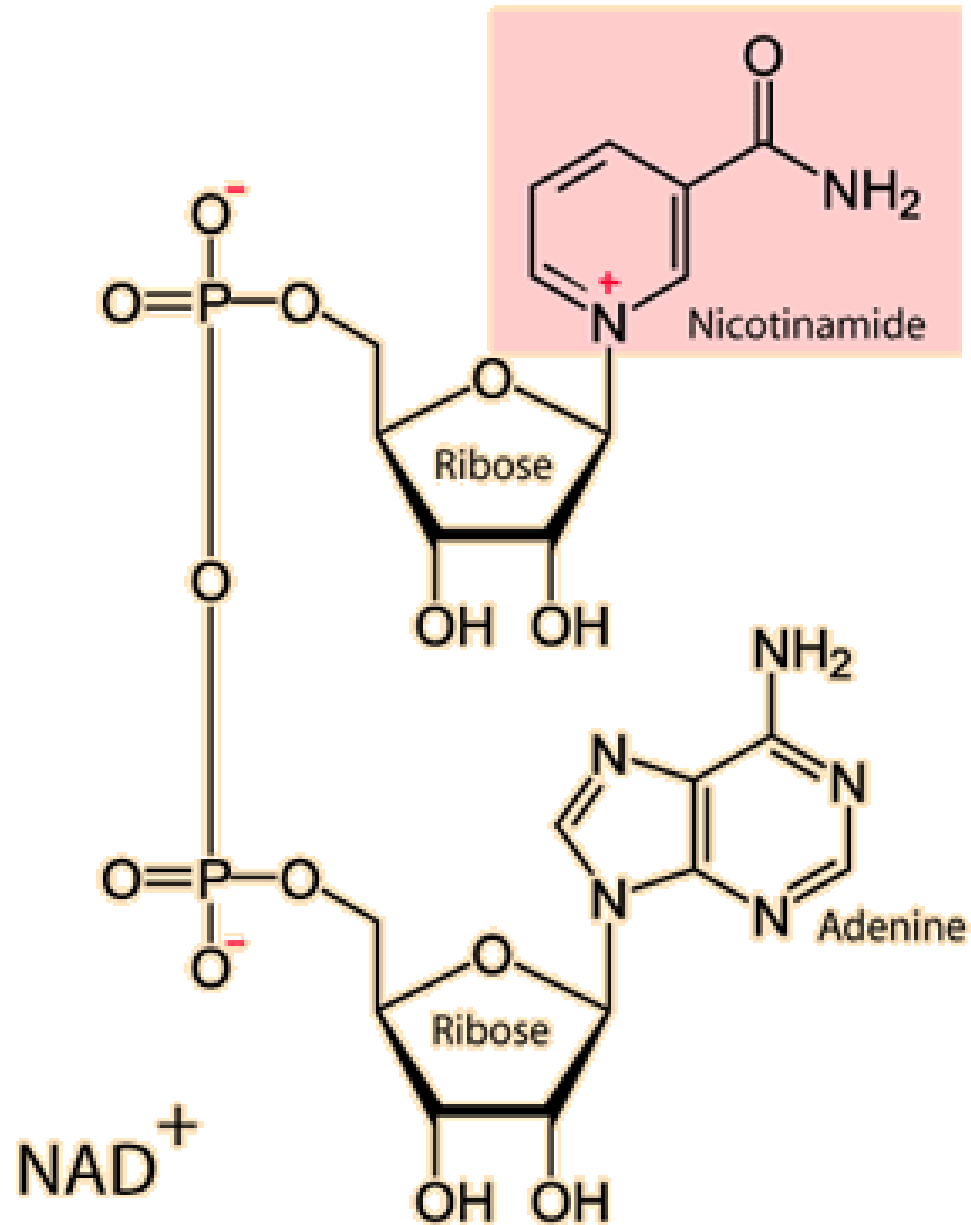
Για παράδειγμα, είδαμε ότι ως **ενεργοποιημένος φορέας για τη μεταφορά φωσφορικών ομάδων** λειτουργεί το ATP.

# Ενεργοποιημένοι φορείς ηλεκτρονίων

## A. Για την οξείδωση των καύσιμων μορίων

Κατά την οξείδωση των καύσιμων μορίων τα ηλεκτρόνια δεν μεταφέρονται απευθείας στο  $O_2$ , αλλά φτάνουν σταδιακά σε αυτό μέσω ειδικών μεταφορέων ηλεκτρονίων, στους οποίους περιλαμβάνονται νουκλεοτίδια πυριδίνης, είτε *φλαβίνες*.

Ο κυριότερος φορέας ηλεκτρονίων κατά την οξείδωση ενός υποστρώματος είναι το **νικοτιναμίδο-αδενίνο-δινουκλεοτίδιο (NAD<sup>+</sup>)**.



Το δραστικό μέρος είναι ο δακτύλιος του νικοτιναμιδίου, που συντίθεται από τη βιταμίνη νιασίνη.

Νικοτιναμιδο-αδενινο-δινουκλεοτίδιο



**Oxidized: NAD<sup>+</sup>**

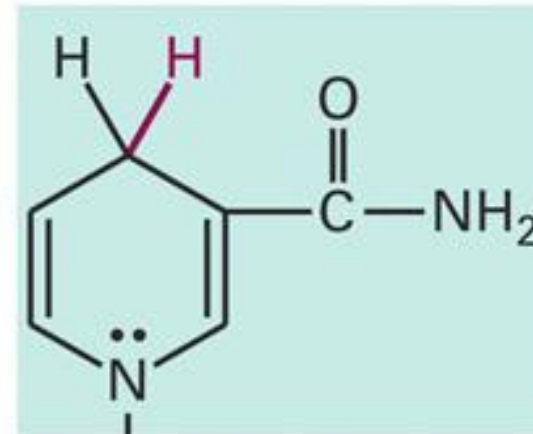


Ribose

2P

Adenosine

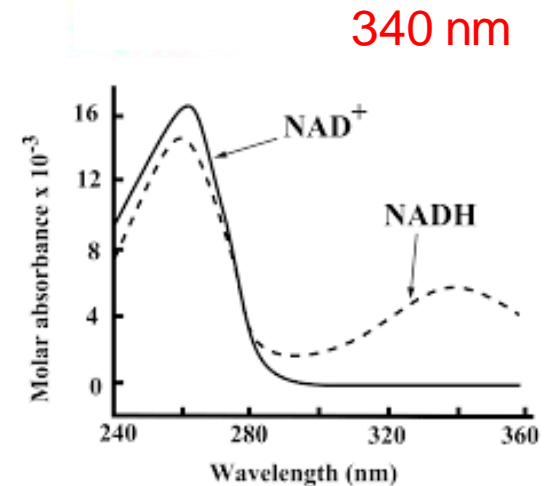
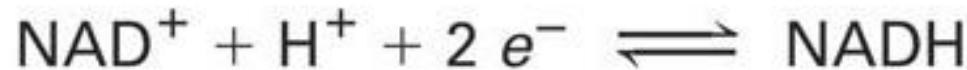
**Reduced: NADH**



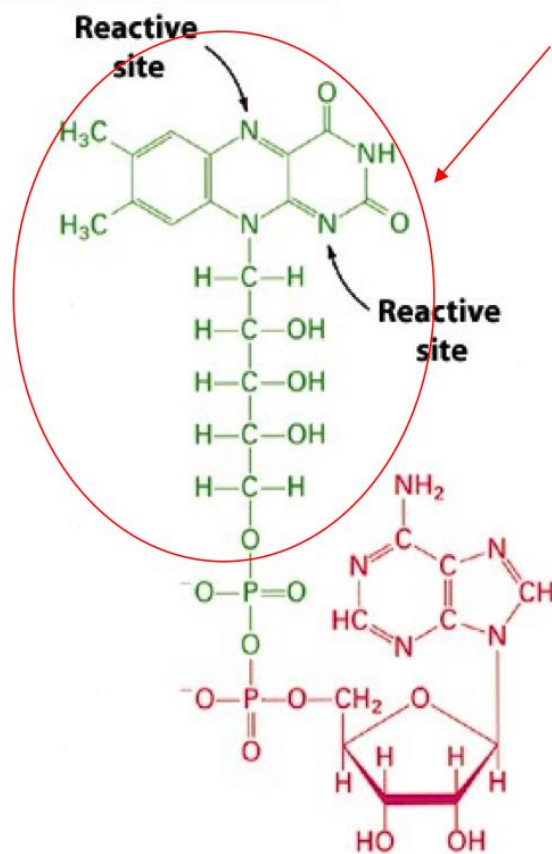
Ribose

2P

Adenosine

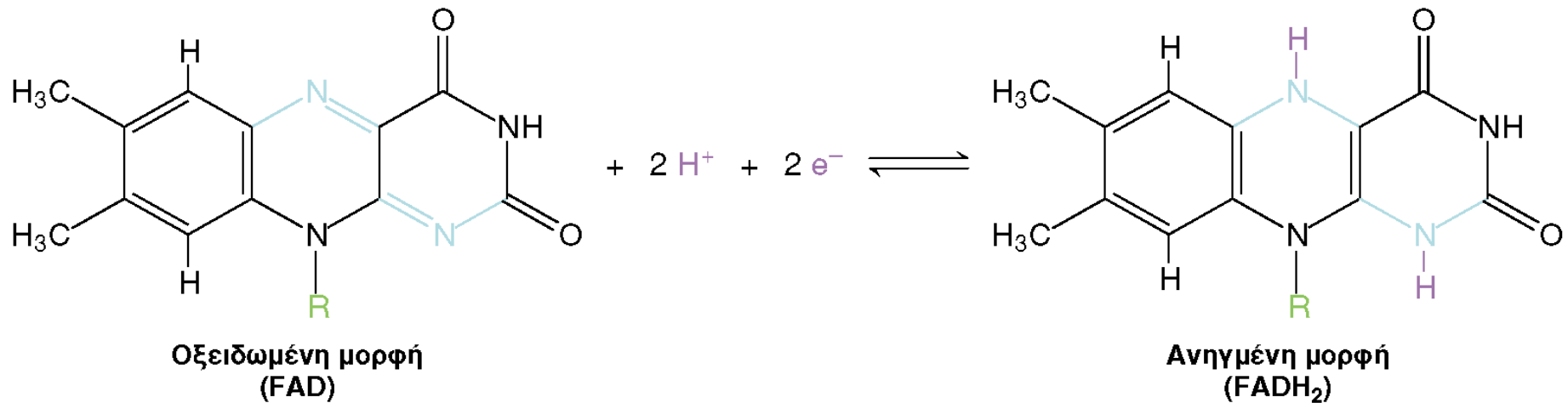


Ο άλλος κύριος φορέας ηλεκτρονίων κατά την οξείδωση των καύσιμων μορίων είναι το συνένζυμο **φλαβίνο-αδενίνο-δινουκλεοτίδιο (FAD)**.

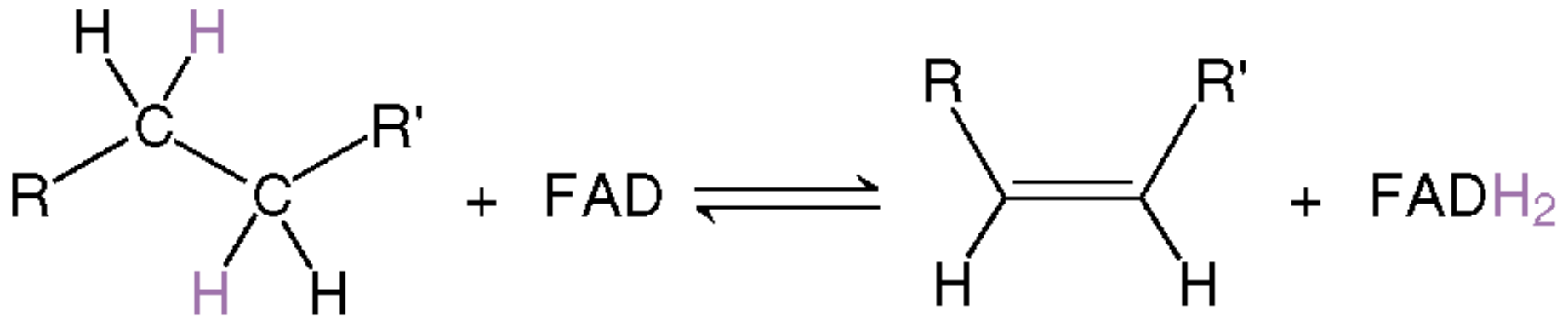


παράγωγο της  
βιταμίνης  
ριβοφλαβίνη.

Το FAD δέχεται δύο ηλεκτρόνια και δύο πρωτόνια.



Το FAD είναι δέκτης ηλεκτρονίων σε αντιδράσεις του τύπου:



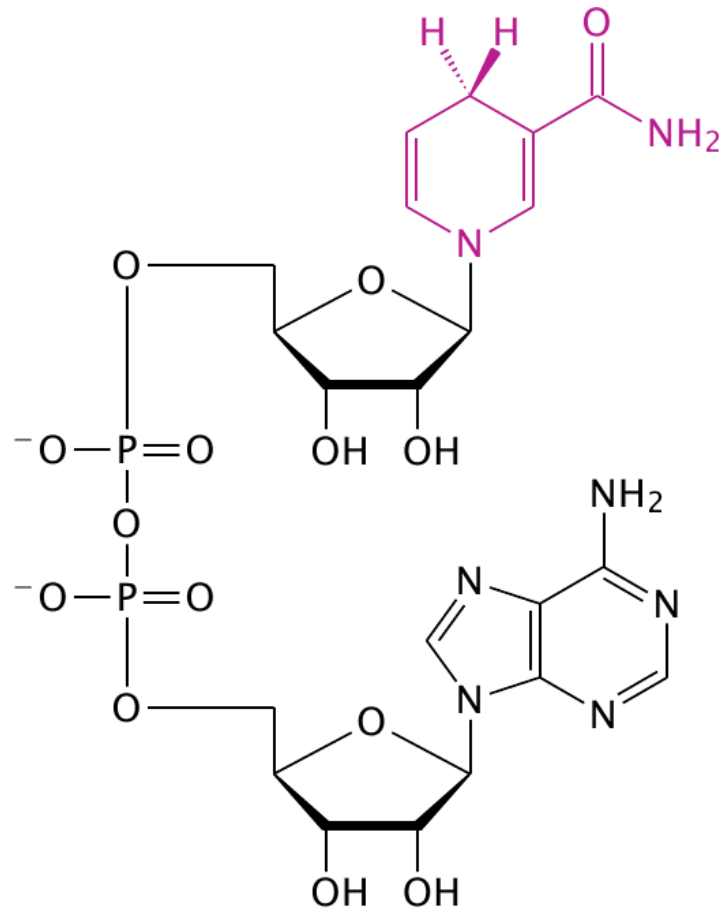
# Ενεργοποιημένοι φορείς ηλεκτρονίων

## B. Για την αναγωγική βιοσύνθεση

Στις περισσότερες βιοσυνθετικές αντιδράσεις χρειάζονται ηλεκτρόνια υψηλού δυναμικού δεδομένου ότι οι πρόδρομες ενώσεις είναι περισσότερο οξειδωμένες από ότι τα προϊόντα.

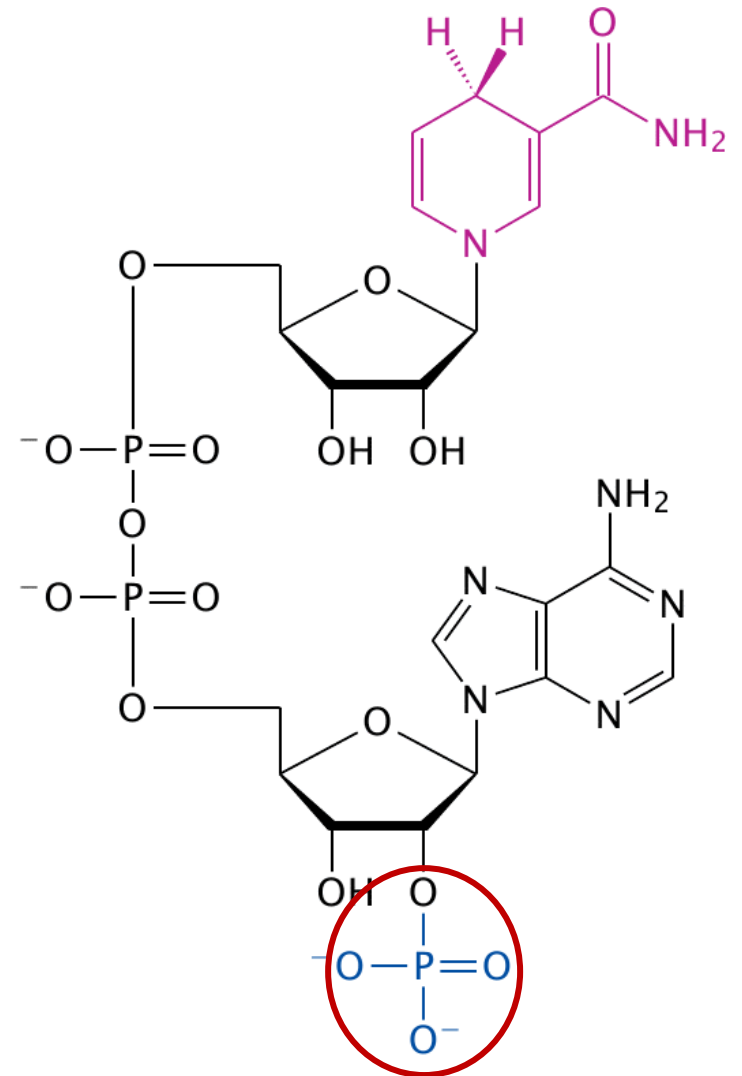
Ως δότης ηλεκτρονίων στις αντιδράσεις αυτές χρησιμοποιείται η ανηγμένη μορφή του φωσφορικού νικοτιναμίδο-αδενίνου-δινουκλεοτίδιο (NADP<sup>+</sup>).

# NADH

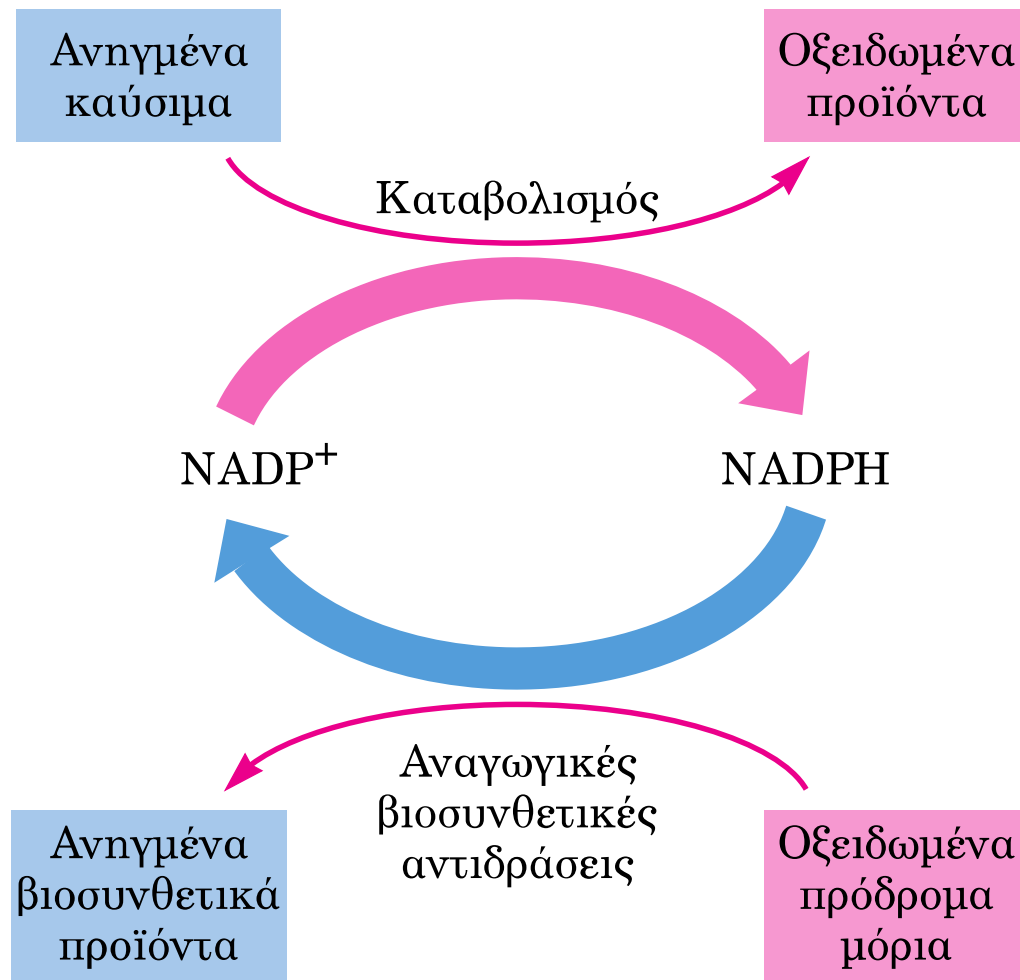


-

# NADPH



# Το NADPH παρέχει την αναβολική ισχύ για τις αναβολικές διαδικασίες



Μεταφορά των αναγωγικών ισοδύναμων από τον καταβολισμό στον αναβολισμό μέσω του κύκλου του NADPH.

Τι πειράματα μπορούν να γίνουν για τη διαλεύκανση των μεταβολικών μονοπατιών;

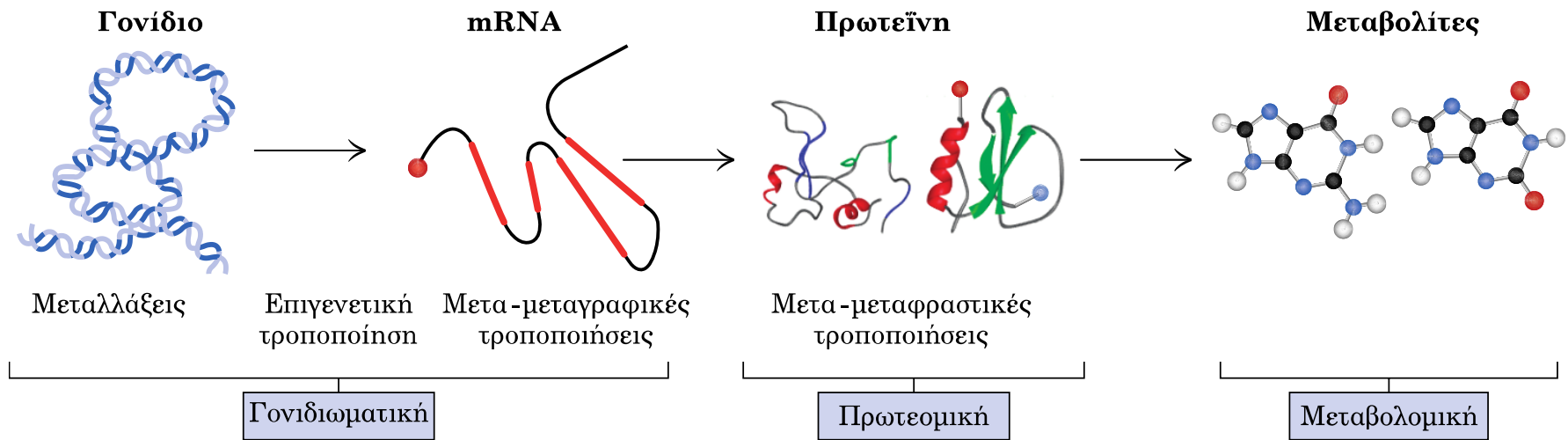
- Οι μεταβολικοί αναστολείς ήταν σημαντικά εργαλεία για την αποσαφήνιση των βημάτων του μεταβολικού μονοπατιού
- Χρησιμοποιήθηκαν επίσης μεταλλαγές για τη δημιουργία ειδικών μεταβολικών φραγμών
- Μεταβολικά μονοπάτια έχουν διαλευκανθεί με τη χρήση ισοτοπικών μορφών στοιχείων όπως ο  $^{14}\text{C}$  και ο  $^{32}\text{P}$

# Μεταβόλομα

- Το **μεταβόλομα** είναι το πλήρες σύνολο μορίων χαμηλού μοριακού βάρους που υπάρχουν σε έναν οργανισμό και εκκρίνονται από αυτόν υπό δεδομένο σύνολο συνθηκών
- Η **μεταβολομική** είναι η συστηματική ταυτοποίηση και ποσοτικοποίηση όλων αυτών των μεταβολιτών σε έναν δεδομένο οργανισμό ή δείγμα
- Η **φασματομετρία μάζας (MS)** και ο **πυρηνικός μαγνητικός συντονισμός (NMR)** είναι και οι δύο ισχυρές τεχνικές για τη μεταβολομική ανάλυση
- Η **MS** προσφέρει απaráμιλλη ευαισθησία για την ανίχνευση μεταβολιτών σε χαμηλές συγκεντρώσεις
- Ο **NMR** παρέχει αξιοσημείωτη ανάλυση και διάκριση των μεταβολιτών σε σύνθετα μείγματα



# Τι μας λέει το μεταβόλομα για ένα βιολογικό σύστημα;



Τα πεδία της –ομικής (–omics) της σύγχρονης βιοχημείας και μοριακής βιολογίας, σε σχέση με τον μεταβολισμό.