

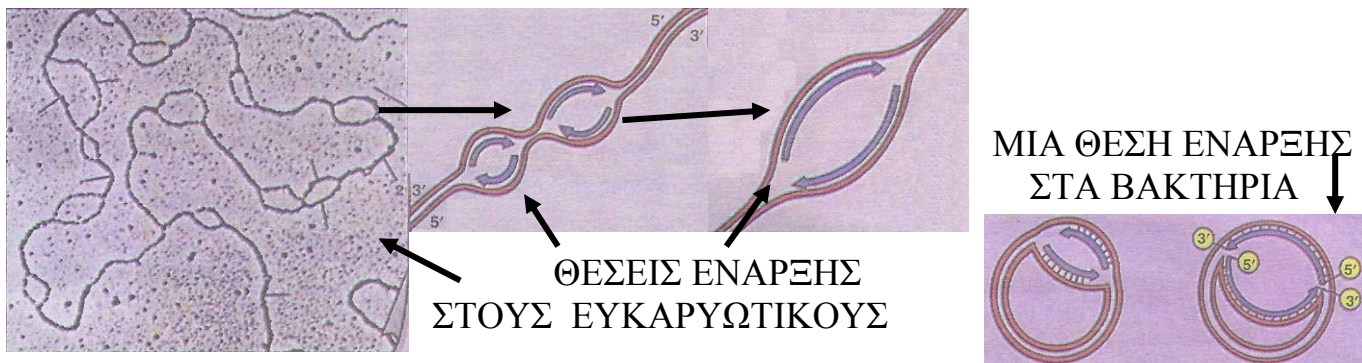
ΑΝΤΙΓΡΑΦΗ-ΕΚΦΡΑΣΗ-ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΗΣ ΓΕΝΕΤΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ

2.1 Αντιγραφή DNA

Οι Watson και Crick (1953) πρότειναν την διπλή έλικα που ξετυλίγεται και κάθε αλυσίδα λειτουργεί σαν καλούπι για τη σύνθεση μιας νέας συμπληρωματικής αλυσίδας. Τα δύο θυγατρικά μόρια είναι πανομοιότυπα με το μητρικό και καθένα αποτελείται από μια παλιά και μια νέα αλυσίδα (ημισυντηρητικός μηχανισμός).

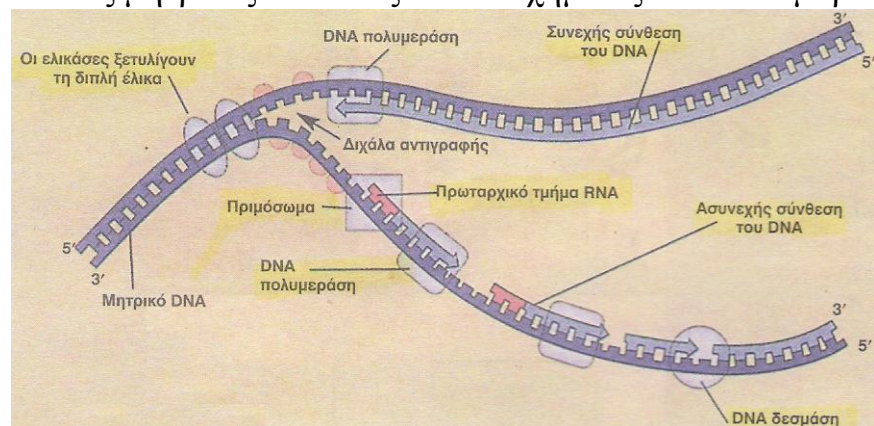
Ο μηχανισμός μελετήθηκε κυρίως στην *E. coli* γιατί είναι μικρότερο από των ευκαρυωτικών, πάντως παρουσιάζει πολλές ομοιότητες και στα 2 είδη κυττάρων.

Η αντιγραφή αρχίζει από καθορισμένα σημεία, τις **θέσεις έναρξης της αντιγραφής**. Το βακτηριακό DNA (κυκλικό) έχει μόνο 1 θέση έναρξης και αντιγράφεται σε 30 λεπτά. Στα ευκαρυωτικά κύτταρα πριν την αντιγραφή είναι 1 μακρύ μόριο με πολλές θέσεις έναρξης αντιγραφής, οπότε αντιγράφεται σε πολλά σημεία που ενώνονται κατόπιν μεταξύ τους. Η αντιγραφή των ανώτερων είναι 1000 φορές ταχύτερη από των προκαρυωτικών.



Το ξετύλιγμα των ελίκων κάνουν οι **DNA ελικάσες** δημιουργώντας «θηλιά» που αυξάνει προς τις 2 κατευθύνσεις και φαίνεται στο οπτικό μικροσκόπιο.

Τα κυρίως ένζυμα είναι οι **DNA πολυμεράσες**. Επειδή όμως αυτές δεν μπορούν να αρχίσουν την αντιγραφή, το κύτταρο έχει ένα ειδικό σύμπλοκο από πολλά ένζυμα, **το πριμόσωμα**, που συνθέτει στις θέσεις αντιγραφής μικρά τμήματα RNA συμπληρωματικά με τις δύο μητρικές αλυσίδες, **τα πρωταρχικά τμήματα**. Οι **DNA πολυμεράσες** επιμηκύνουν τα πρωταρχικά τμήματα, τοποθετώντας συμπληρωματικά δεοξυριβονουκλεοτίδια απέναντι από τις μητρικές αλυσίδες οπότε σχηματίζονται νέα μόρια DNA καθώς δημιουργούνται



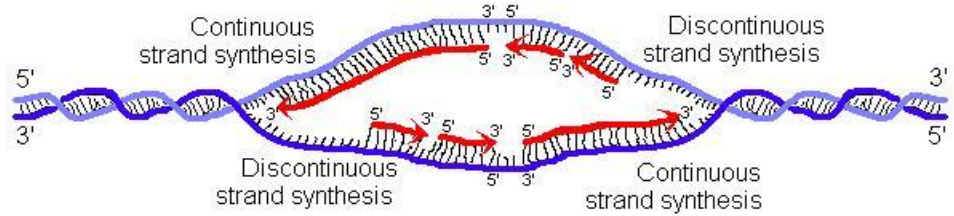
δεσμοί υδρογόνου μεταξύ των συμπληρωματικών βάσεων.

DNA πολυμεράσες επιδιορθώνουν λάθη απομακρύνοντας νουκλεοτίδια που είχαν τοποθετήσει κατά παράβαση της συμπληρωματικότητας και τοποθετώντας τα σωστά. Οι **DNA πολυμεράσες** τέλος

απομακρύνουν τα πρωταρχικά τμήματα και τα αντικαθιστούν με τμήματα DNA.

Λειτουργούν μόνο σε καθορισμένη κατεύθυνση τοποθετώντας τα νουκλεοτίδια στο

ελεύθερο 3' άκρο της δεοξυριβόζης του τελευταίου νουκλεοτιδίου. Κάθε νεοσυντιθέμενη αλυσίδα έχει κατεύθυνση 5' → 3'. Σε κάθε διπλή έλικα οι 2 αλυσίδες είναι αντιπαράλληλες και για να συμβεί αυτό, η σύνθεση είναι **συνεχής** στη μία αλυσίδα και **ασυνεχής** στην άλλη. Τα κομμάτια της ασυνεχούς αλυσίδας συνδέονται με τη βοήθεια της **DNA δεσμάσης** που συνδέει και όλα τα κομμάτια της αντιγραφής.



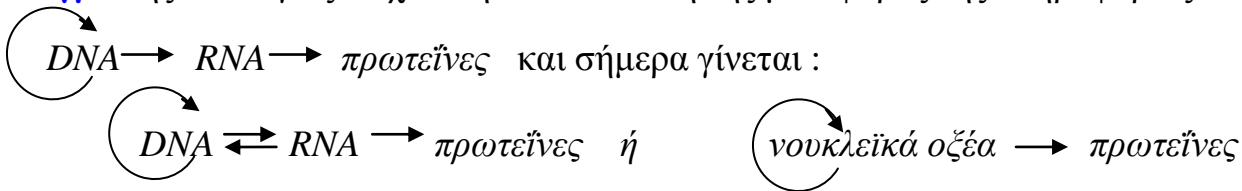
A replication bubble showing old DNA strands in blue, and newly synthesized DNA strands in red. The new strand is made only in the 5' to 3' direction.

Η αντιγραφή είναι ακριβέστατη με 1 λάθος κάθε 100000 νουκλεοτίδια. Τα λάθη που δεν επιδιορθώνουν οι **DNA πολυμεράσες** επιδιορθώνονται από **ειδικά επιδιορθωτικά ένζυμα** και το λάθος περιορίζεται σε 1 κάθε 10^{10} νουκλεοτίδια.

2.2 Έκφραση γενετικής πληροφορίας

A. ΡΟΗ

Για να εκφραστεί η πληροφορία πρέπει πρώτα να μεταφερθεί από το DNA στο RNA με την **μεταγραφή** και το RNA την μεταφέρει στις πρωτεΐνες με την **μετάφραση**. Το **κεντρικό δόγμα** της Βιολογίας δείχνει την κατεύθυνση της μεταφοράς της πληροφορίας:



Η γενετική πληροφορία είναι η καθορισμένη σειρά των βάσεων. Η πληροφορία υπάρχει σε τμήματα του DNA με καθορισμένη ακολουθία, **τα γονίδια**. Αυτά καθορίζουν τη σειρά των αμινοξέων στην πρωτεΐνη, δηλαδή η μεταγραφή και η μετάφραση επιτελούν την **γονιδιακή έκφραση**.

Μερικοί RNA ιοί έχουν ένα ένζυμο που χρησιμοποιεί σαν καλούπι το RNA για να συνθέσει DNA, την **αντίστροφη μεταγραφάση**. Σε μερικούς ιούς το RNA διπλασιάζεται.

Η αντιγραφή διακωδικοποιεί την πληροφορία, η μεταγραφή καθορίζει ποια γονίδια θα εκφραστούν, σε ποιους ιστούς και σε ποια στάδια ανάπτυξης, ενώ η μετάφραση χρησιμοποιεί την πληροφορία για την κατασκευή πολυπεπτιδίου. Όλα τα κύτταρα έχουν το ίδιο DNA όμως σε κάθε ομάδα κυττάρων εκφράζονται διαφορετικά γονίδια, π.χ. στα ερυθροκύτταρα τα γονίδια της αιμοσφαιρίνης και στα Β-λεμφοκύτταρα τα γονίδια των ανοσοσφαιρινών.

Τα γονίδια διακρίνονται σε :

- ❖ Όσα μεταγράφονται σε mRNA και μεταφράζονται σε πρωτεΐνες
- ❖ Όσα μεταγράφονται παράγοντας rRNA, tRNA και snRNA

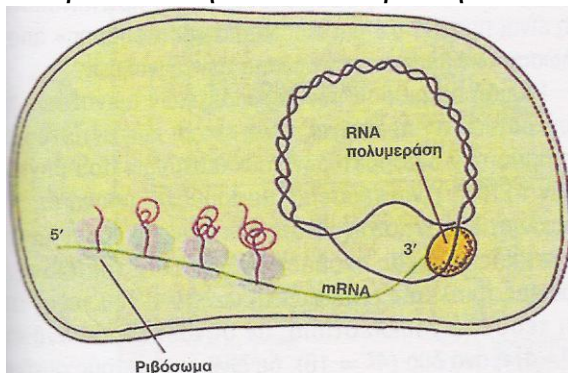
Το ανθρώπινο γονιδίωμα έχει μήκος $3 \cdot 10^9$ ζεύγη βάσεων και από αυτό πολύ μικρό μέρος αποτελεί τα γονίδια. Τα 4 είδη RNA είναι :

- Αγγελιαφόρο (mRNA) μεταφέρει πληροφορία για παραγωγή πολυπεπτιδικής αλυσίδας
- Ριβοσωμικό (rRNA) συνδέεται με πρωτεΐνες δομώντας το ριβόσωμα

- **Μεταφορικό (tRNA)** συνδέεται με συγκεκριμένο αμινοξύ και το μεταφέρει στη θέση της πρωτεϊνοσύνθεσης
- **Μικρό πυρηνικό (snRNA)** συνδέεται με πρωτεΐνες, καταλύει την ωρίμανση του mRNA

B. ΜΕΤΑΓΡΑΦΗ

Ο μηχανισμός είναι ίδιος τόσο στους προκαρυωτικούς όσο και στους ευκαρυωτικούς. Καταλύεται από την **RNA πολυμεράση** (στους ευκαρυωτικούς είναι 3 μόρια). Η **RNA πολυμεράση** προσδένεται σε ειδικές περιοχές του DNA, τους **υποκινητές** με τη βοήθεια πρωτεϊνών που ονομάζονται **μεταγραφικοί παράγοντες**. Υποκινητές (πάντα πριν την αρχή κάθε γονιδίου) και μεταγραφικοί παράγοντες είναι τα στοιχεία που ρυθμίζουν τη σωστή έναρξη της μεταγραφής. Η **RNA πολυμεράση** προσδένεται στον υποκινητή προκαλώντας το ξετύλιγμα της διπλής έλικας και τοποθετεί τα ριβονουκλεοτίδια απέναντι από τα δεοξυριβονουκλεοτίδια μιας αλυσίδας με βάση την συμπληρωματικότητα (απέναντι από A τοποθετείται U). Η **RNA πολυμεράση** συνδέει τα ριβονουκλεοτίδια που προστίθενται με 3'-5' φωσφοδιεστερικό δεσμό, άρα η μεταγραφή έχει προσανατολισμό 5'→3'. Η σύνθεση σταματά στο τέλος του γονιδίου όπου ειδικές αλληλουχίες, οι **αλληλουχίες λήξης**, επιτρέπουν την απελευθέρωσή του.

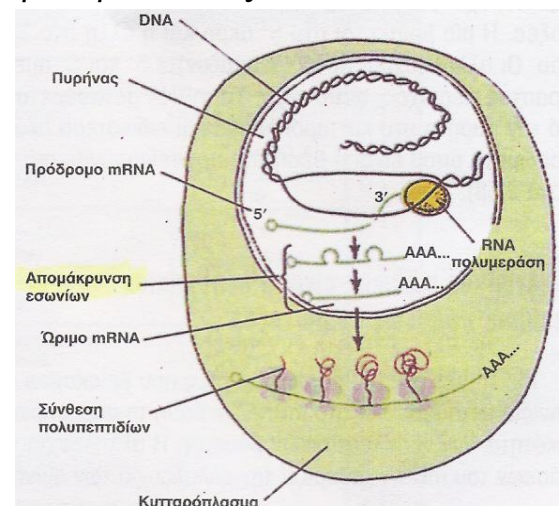


Το μόριο RNA που συντίθεται είναι συμπληρωματικό προς τη μια αλυσίδα της διπλής έλικας του DNA του γονιδίου, την **μη κωδική**, που μεταγράφεται. Η συμπληρωματική αλυσίδα του DNA του γονιδίου που δεν μεταγράφεται, λέγεται **κωδική**. Στους προκαρυωτικούς το mRNA μεταφράζεται πριν τελειώσει η μεταγραφή

του επειδή δεν υπάρχει μεμβράνη.

Στους ευκαρυωτικούς το mRNA που παράγεται δεν είναι έτοιμο να μεταφραστεί αλλά υφίσταται **ωρίμανση**. Η ωρίμανση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα περισσότερα γονίδια των ευκαρυωτικών είναι **ασυνεχή ή διακοπτόμενα**, δηλαδή η αλληλουχία που μεταφράζεται σε αμινοξέα, το **εξόνιο**, διακόπτεται από ενδιάμεσες αλληλουχίες που δεν μεταφράζονται, τα **εσώνια**. Όταν ένα γονίδιο με εσώνια μεταγράφεται δημιουργείται το **πρόδρομο mRNA** που περιέχει τόσο εξώνια όσο και εσώνια.

Ριβονουκλεοπρωτεϊκά σωματίδια από snRNA και πρωτεΐνες λειτουργούν σαν ένζυμα κόβοντας τα εσώνια και συρράπτοντας τα εξώνια οπότε σχηματίζεται το **ώριμο mRNA**. Παρότι αποτελείται από εξώνια έχει δύο περιοχές που δεν μεταφράζονται σε αμινοξέα. Η μία είναι στο 5' άκρο και η άλλη στο 3' άκρο, οι **αμετάφραστες περιοχές**. Κατόπιν το mRNA μεταφέρεται στα ριβοσώματα του κυτταροπλάσματος για την πρωτεϊνοσύνθεση.



Γ. ΓΕΝΕΤΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ

Η αλληλουχία βάσεων του mRNA καθορίζει την αλληλουχία των αμινοξέων στις πρωτεΐνες με βάση έναν κώδικα αντιστοίχισης, τον **γενετικό κώδικα**. Γι' αυτό η πρωτεϊνοσύνθεση είναι διαδικασία μετάφρασης της γλώσσας των βάσεων σε γλώσσα αμινοξέων. Επειδή ο αριθμός των αμινοξέων είναι είκοσι, ο συνδυασμός των 4 νουκλεοτιδίων ανά ένα ($4^1=4$) και ανά ζεύγος ($4^2=16$) δεν φτάνουν, ενώ ανά τρία (τριπλέτα, $4^3=64$) υπερκαλύπτουν. Τα χαρακτηριστικά λοιπόν του γενετικού κώδικα είναι :

1. Είναι **κώδικας τριπλέτας**, δηλαδή μία τριάδα νουκλεοτιδίων, **το κωδικόνιο**, κωδικοποιεί ένα αμινοξύ
2. Είναι **συνεχής**, δηλαδή το mRNA διαβάζεται συνεχώς ανά 3 νουκλεοτίδια χωρίς να παραλείπεται κάποιο
3. Είναι **μη επικαλυπτόμενος**, δηλαδή κάθε νουκλεοτίδιο ανήκει σε ένα μόνο κωδικόνιο
4. Είναι **σχεδόν καθολικός**, αφού όλοι οι οργανισμοί έχουν τον ίδιο κώδικα (mRNA οποιουδήποτε οργανισμού μπορεί να μεταφραστεί in vitro σε φυτό, ζώο ή βακτήριο και να παραχθεί η ίδια πρωτεΐνη)
5. Είναι **εκφυλισμένος**, διότι μόνο 2 αμινοξέα (μεθειονίνη, τρυπτοφάνη) κωδικοποιούνται από 1 μόνο κωδικόνιο ενώ τα υπόλοιπα 18 αμινοξέα από 2-6 διαφορετικά κωδικόνια. Αυτά τα κωδικόνια που κωδικοποιούν το ίδιο αμινοξύ ονομάζονται **συνώνυμα**
6. Έχει **κωδικόνιο έναρξης**, το AUG, που κωδικοποιεί το αμινοξύ μεθειονίνη και έχει **κωδικόνια λήξης**, τα UGA, UAG και UAA που τερματίζουν την σύνθεση της πολυπεπτιδικής αλυσίδας.

		Δεύτερο γράμμα				
		U	C	A	G	
Πρώτο γράμμα	U	UUU } φαινυλαλανίνη UUC } (phe) UUA } λευκίνη UUG } (leu)	UCU } UCC } σερίνη UCA } (ser) UCG }	UAU } τυροσίνη UAC } (tyr) UAA } λήξη UAG } λήξη	UGU } κυστεΐνη UGC } (cys) UGA } λήξη UGG } τρυπτοφάνη (trp)	U C A G
	C	CUU } CUC } λευκίνη CUA } (leu) CUG }	CCU } CCC } προλίνη CCA } (pro) CCG }	CAU } ιστιδίνη CAC } (his) CAA } γλουταμίνη CAG } (glu)	CGU } CGC } αργινίνη CGA } (arg) CGG }	U C A G
	A	AUU } ισολευκίνη AUC } (ile) AUA } AUG } μεθειονίνη (met) έναρξη	ACU } ACC } θρεονίνη ACA } (thr) ACG }	AAU } ασπαραγίνη AAC } (asn) AAA } λυσίνη AAG } (lys)	AGU } σερίνη AGC } (ser) AGA } αργινίνη AGG } (arg)	U C A G
	G	GUU } GUC } βαλίνη GUA } (val) GUG }	GCU } GCC } αλανίνη GCA } (ala) GCG }	GAU } ασπαρτικό οξύ GAC } (asp) GAA } γλουταμικό οξύ GAG } (glu)	GGU } GGC } γλυκίνη GGA } (gly) GGG }	U C A G

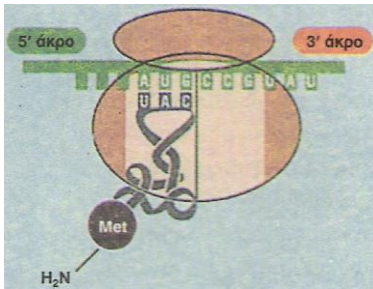
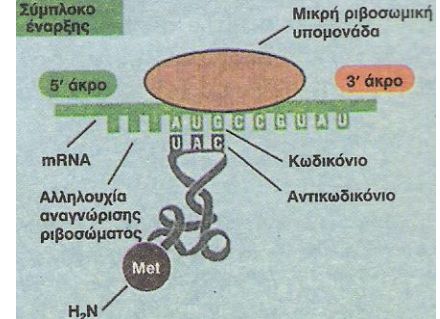
Ο όρος κωδικόνιο αφορά τόσο το mRNA όσο και το γονίδιο από το οποίο παράγεται, έτσι το κωδικόνιο έναρξης AUG αντιστοιχεί στο κωδικόνιο έναρξης της κωδικής αλυσίδας του γονιδίου ATG κ.λ.π. Το τμήμα ενός γονιδίου και του mRNA του που κωδικοποιεί μια πολυπεπτιδική αλυσίδα αρχίζει με το κωδικόνιο έναρξης και τελειώνει με το κωδικόνιο λήξης.

Δ. ΜΕΤΑΦΡΑΣΗ

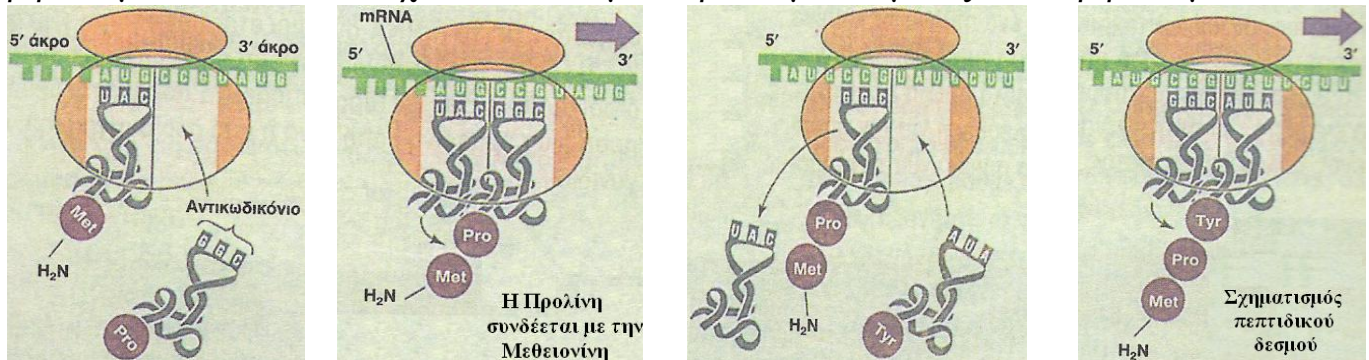
Η αντιστοίχιση των νουκλεοτιδίων του mRNA με αμινοξέα και η σύνδεση των αμινοξέων σε πολυπεπτιδική αλυσίδα γίνεται με τη βοήθεια των tRNA και τη συμμετοχή πρωτεϊνών και ενέργειας. Τα ριβοσώματα χρησιμοποιούνται σαν θέση μετάφρασης οποιουδήποτε mRNA. Αυτό εξηγεί το γιατί μπορούν τα βακτήρια να χρησιμοποιηθούν σαν «εργοστάσια παραγωγής ανθρώπινων πρωτεϊνών».

Κάθε ριβόσωμα αποτελείται από 2 υπομονάδες, μία μεγάλη και μία μικρή και έχει μία θέση πρόσδεσης του mRNA στη μικρή υπομονάδα και 2 θέσεις εισδοχής των tRNA στη μεγάλη υπομονάδα. Κάθε μόριο tRNA έχει μία ειδική τριπλέτα νουκλεοτιδίων, το **αντικωδικόνιο**, με την οποία προσδένεται λόγω συμπληρωματικότητας με το αντίστοιχο κωδικόνιο του mRNA. Κάθε μόριο tRNA διαθέτει μία ειδική θέση σύνδεσης με ένα συγκεκριμένο αμινοξύ. Η πρωτεϊνοσύνθεση περιλαμβάνει 3 στάδια : την έναρξη, την επιμήκυνση και τη λήξη.

✓ **Έναρξη.** Το mRNA προσδένεται συμπληρωματικά μέσω της αλληλουχίας στο αμετάφραστο άκρο του με το rRNA στη μικρή υπομονάδα του ριβοσώματος. Το πρώτο κωδικόνιο του mRNA είναι πάντα AUG και σ' αυτό προσδένεται tRNA που μεταφέρει μεθειονίνη. Όλες οι πρωτεΐνες όμως δεν διαθέτουν σαν 1^ο αμινοξύ την μεθειονίνη γιατί απομακρύνονται μερικά αμινοξέα από το αρχικό αμινικό άκρο τους. Το σύμπλοκο **μικρή υπομονάδα- mRNA- tRNA μεθειονίνης** ονομάζεται **σύμπλοκο έναρξης** της πρωτεϊνοσύνθεσης. Κατόπιν η μεγάλη υπομονάδα συνδέεται με τη μικρή.

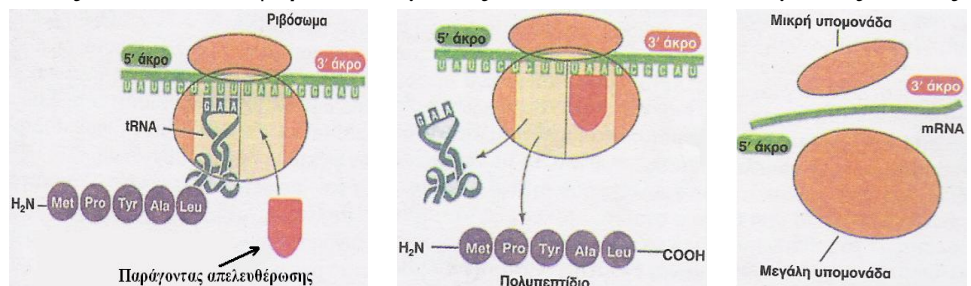


✓ **Επιμήκυνση.** Ένα 2^ο μόριο tRNA με αντικωδικόνιο συμπληρωματικό του 2^{ου} κωδικόνιου του mRNA τοποθετείται στην κατάλληλη εισδοχή του ριβοσώματος μεταφέροντας το 2^ο αμινοξύ. Μεταξύ της μεθειονίνης και του 2^{ου} αμινοξέος σχηματίζεται πεπτιδικός δεσμός και αμέσως το πρώτο tRNA αποσυνδέεται από το ριβόσωμα και ελευθερώνεται στο κυτταρόπλασμα όπου συνδέεται με μεθειονίνη για επόμενη χρήση. Το ριβόσωμα και το mRNA έχουν 1 tRNA με 2 προσδεμένα αμινοξέα. Το ριβόσωμα κινείται

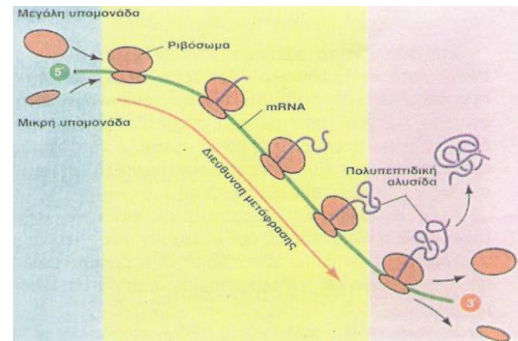


κατά μήκος του mRNA κατά 1 κωδικόνιο. Το 3^ο tRNA προσδένεται μεταφέροντας το αμινοξύ του. Ανάμεσα στο 2^ο και 3^ο αμινοξύ σχηματίζεται πεπτιδικός δεσμός. Η αλυσίδα συνεχίζει να αναπτύσσεται καθώς νέα tRNA φέρνουν αμινοξέα που συνδέονται μεταξύ τους.

✓ **Λήξη.** Η επιμήκυνση σταματά σε ένα κωδικόνιο λήξης (UGA, UAG ή UAA), επειδή δεν υπάρχουν tRNA που να αντιστοιχούν σ'



αυτά. Το τελευταίο tRNA απομακρύνεται από το ριβόσωμα και η πολυπεπτιδική αλυσίδα ελευθερώνεται. Πολλά μόρια mRNA μπορεί να μεταγράφονται από 1 μόνο γονίδιο. Πολλά ριβοσώματα μπορούν να μεταφράζουν 1 mRNA, το καθένα όμως σε διαφορετικό σημείο κατά μήκος του μορίου. Αμέσως μόλις το ριβόσωμα έχει μεταφράσει τα πρώτα κωδικόνια, η θέση έναρξης είναι ελεύθερη για πρόσδεση ενός άλλου ριβοσώματος. Το σύμπλεγμα ριβοσωμάτων με το mRNA λέγεται **πολύσωμα**. Ένα κύτταρο μπορεί να παράγει μεγάλα ποσά μιας πρωτεΐνης από 1-2 αντίγραφα γονιδίου.



2.3 Γονιδιακή ρύθμιση (Έλεγχος γονιδιακής έκφρασης)

Γονιδιακή έκφραση είναι η διαδικασία με την οποία ένα γονίδιο ενεργοποιείται για να παράγει μια πρωτεΐνη. Όμως όλες οι πρωτεΐνες δεν παράγονται κάθε στιγμή ή σε ίσες ποσότητες, γιατί αντίθετα θα υπήρχε είτε υπερπαραγωγή είτε έλλειψη. Απαραίτητη είναι επομένως η ρύθμιση για το είδος και την ποσότητα των πρωτεϊνών σε κάθε χρονική στιγμή.

Στα βακτήρια η ρύθμιση αποσκοπεί στην προσαρμογή για να εξασφαλίζονται οι βασικές λειτουργίες (αύξηση και διαίρεση).

Σε πολυκύτταρους οργανισμούς τα κύτταρα διαφέρουν στη δομή και τις λειτουργίες τους. Το ζυγωτό διαιρείται με μίτωση και παράγει τρισεκατομμύρια κύτταρα με τα ίδια γονίδια. Στα αρχικά στάδια της εμβρυογένεσης τα κύτταρα εξειδικεύονται για να εκτελέσουν επιμέρους λειτουργίες, διαδικασία γνωστή σαν κυτταρική διαφοροποίηση. Κύτταρα όπως τα νευρικά, ηπατικά, μυϊκά διαφέρουν στη μορφή και τις λειτουργίες αλλά έχουν τα ίδια γονίδια, επομένως έχουν μηχανισμούς που επιτρέπουν να εκφράζεται η γενετική πληροφορία επιλεκτικά. Κάθε κυτταρικός τύπος έχει εξειδικευμένη λειτουργία και πρέπει να υπάρχει πλήρης συντονισμός όλων των κυττάρων έτσι ώστε η ρύθμιση των γονιδίων, λόγω μεγάλης πολυπλοκότητας, να γίνεται σε πολλά επίπεδα.

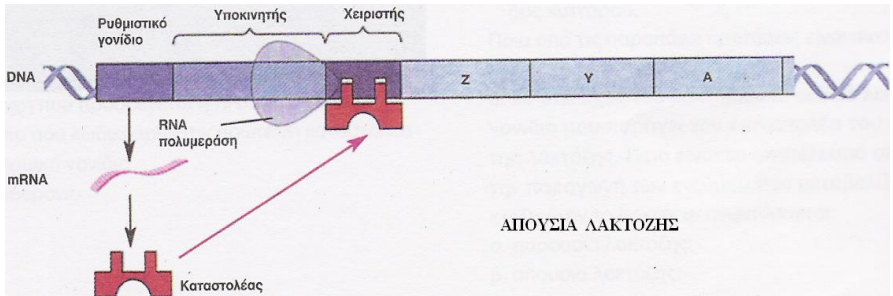
Ένα κύτταρο της *E. coli* έχει περισσότερα από 4000 γονίδια. Μερικά μεταγράφονται συνεχώς και κωδικοποιούν πρωτεΐνες για τις βασικές λειτουργίες του κυττάρου και άλλα γονίδια μεταγράφονται όταν το βακτήριο αναπτύσσεται σε ειδικές συνθήκες παράγοντας πρωτεΐνες απαραίτητες για την επιβίωση στις συνθήκες εκείνες. Η *E. coli*, π.χ. χρησιμοποιεί τη γλυκόζη για πηγή άνθρακα αλλά διαθέτει γονίδια για την παραγωγή των κατάλληλων ενζύμων που διασπούν το δισακχαρίτη λακτόζη σε γλυκόζη και γαλακτόζη. Το 1961 οι Jacob & Monod, περιέγραψαν το μηχανισμό με τον οποίο η *E. Coli* ξυπνά το «κοιμισμένο» γονίδιο που παράγει τα 3 απαραίτητα ένζυμα για τον μεταβολισμό της λακτόζης, όταν στη τροφή της απουσιάζει η γλυκόζη. Τα γονίδια που κωδικοποιούν τα 3 ένζυμα βρίσκονται το ένα δίπλα στο άλλο και αποτελούν μια μονάδα γνωστή ως **οπερόνιο της λακτόζης**.

Στο οπερόνιο αυτό περιλαμβάνονται τα 3 γονίδια που ονομάζονται **δομικά** και αλληλουχίες DNA που ρυθμίζουν τη μεταγραφή των γονιδίων και βρίσκονται πριν από τα δομικά γονίδια και είναι κατά σειρά ένα **ρυθμιστικό γονίδιο**, ο **υποκινητής** και ο **χειριστής**.

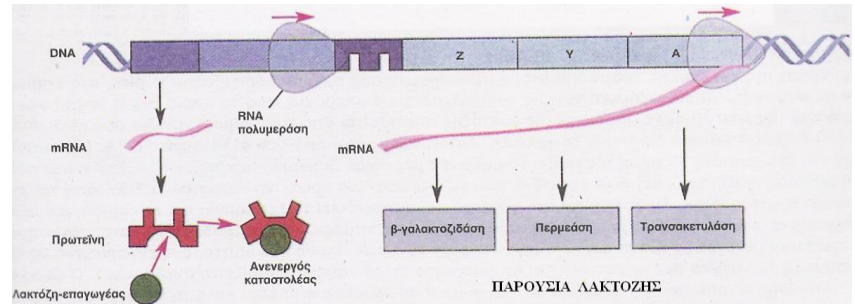
Το οπερόνιο δεν μεταγράφεται ούτε μεταφράζεται αν απουσιάζει από το θρεπτικό υλικό η λακτόζη δηλαδή βρίσκεται σε **καταστολή**. Η καταστολή επιτυγχάνεται από τον χειριστή και

μια ρυθμιστική **πρωτεΐνη-καταστολέα**.

Όταν απουσιάζει η λακτόζη, ο καταστολέας προσδένεται ισχυρά στον χειριστή και εμποδίζεται η RNA πολυμεράση να αρχίσει τη μεταγραφή των 3 γονιδίων. Ο καταστολέας κωδικοποιείται από το ρυθμιστικό γονίδιο που μεταγράφεται συνεχώς και παράγει λίγα μόρια του καταστολέα.



Όταν στο θρεπτικό υλικό υπάρχει μόνο λακτόζη, τότε η λακτόζη προσδένεται στον καταστολέα και δεν του επιτρέπει την πρόσδεση στον χειριστή και άρα η RNA πολυμεράση αρχίζει τη μεταγραφή των 3 γονιδίων, δηλαδή η λακτόζη λειτουργεί σαν **επαγωγέας** της μεταγραφής. Τα 3 ένζυμα μεταφράζονται ταυτόχρονα από το ίδιο μόριο mRNA που περιέχει κωδικόνια έναρξης και λήξης για κάθε ένζυμο. Η λακτόζη επομένως ενεργοποιεί την διαδικασία αποικοδόμησής της και όταν διασπαστεί πλήρως τότε ο καταστολέας μπορεί να προσδεθεί στον χειριστή καταστέλλοντας τη λειτουργία των 3 γονιδίων.



Στους προκαρυωτικούς οργανισμούς τα γονίδια των ενζύμων των μεταβολικών οδών (όπως η διάσπαση της λακτόζης) ή της βιοσύνθεσης των αμινοξέων οργανώνονται σε οπερόνια που υπόκεινται σε κοινό έλεγχο της έκφρασής τους.

Στους ευκαρυωτικούς οργανισμούς η ρύθμιση είναι πολύπλοκη και η διαλεύκανσή της θα εξηγήσει το πώς τα κύτταρα «απορρυθμίζονται» και γίνονται καρκινικά.

Η γονιδιακή έκφραση ρυθμίζεται σε 4 επίπεδα:

- Στο **επίπεδο της μεταγραφής**. Αριθμός μηχανισμών ελέγχουν ποια γονίδια θα μεταγραφούν και με ποια ταχύτητα. Το DNA δεν οργανώνεται σε οπερόνια αλλά κάθε γονίδιο έχει δικό του υποκινητή και μεταγράφεται αυτόνομα. Η RNA πολυμεράση λειτουργεί με τη βοήθεια πρωτεϊνών που ονομάζονται μεταγραφικοί παράγοντες και έχουν μεγάλη ποικιλία. Κάθε κυτταρικός τύπος περιέχει διάφορα είδη μεταγραφικών παραγόντων αλλά μόνο όταν ο σωστός συνδυασμός των μεταγραφικών παραγόντων προσδεθεί στον υποκινητή, αρχίζει η μεταγραφή ενός γονιδίου.
- Στο **επίπεδο μετά τη μεταγραφή**. Περιλαμβάνει μηχανισμούς για την ωρίμανση του mRNA και την ταχύτητα εξόδου του ώριμου mRNA στο κυτταρόπλασμα
- Στο **επίπεδο της μετάφρασης**. Ο χρόνος «ζωής» των mRNA είναι διαφορετικός και μετά αποικοδομούνται. Ποικίλλει επίσης η ικανότητα πρόσδεσης του mRNA στα ριβοσώματα.
- Στο **επίπεδο μετά τη μετάφραση**. Μετά την παραγωγή της πρωτεΐνης πρέπει να υποστεί τροποποιήσεις για να γίνει λειτουργική.