



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

AGRICULTURAL UNIVERSITY OF ATHENS

# Βιοχημεία Τροφίμων Ι

Ενότητα 4<sup>η</sup>  
Γάλα Ι

Όνομα καθηγητή: Έφη Τσακαλίδου

Τμήμα: Επιστήμης Τροφίμων & Διατροφής του Ανθρώπου



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ





# Στόχοι ενότητας

- Κατανόηση της σύστασης και της βιοσύνθεσης του γάλακτος
- Κατανόηση των λιπαρών συστατικών του γάλακτος και της βιοσύνθεσης τους
- Κατανόηση της δομής και της λειτουργικότητας των καζεϊνών του γάλακτος



# Λέξεις - κλειδιά

- Λέξεις κλειδιά: Γάλα, Σύσταση, Βιοσύνθεση, Λίπος, Πρωτεΐνες, Καζεΐνες
- Key words: Milk, Composition, Biosynthesis, Fat, Proteins, Caseins



# Γάλα

- **Υγρό**

- εκκρίνεται από τους μαστούς των θηλυκών θηλαστικών
- καλύπτει διατροφικές ανάγκες των νεογνών
- 4.500 περίπου διαφορετικά είδη στην φύση.

- **Από τις πιο σημαντικές πηγές**

- ζωικών πρωτεϊνών,
- βιταμινών,
- απαραίτητων λιπαρών οξέων



# Πηγές και Παραγωγή

## Πηγές προέλευσης

- Αγελάδα
- Βουβάλι
- Αίγες
- Πρόβατο
- Καμήλα
- Φοράδα
- Γιακ

## Παγκόσμια ετήσια παραγωγή

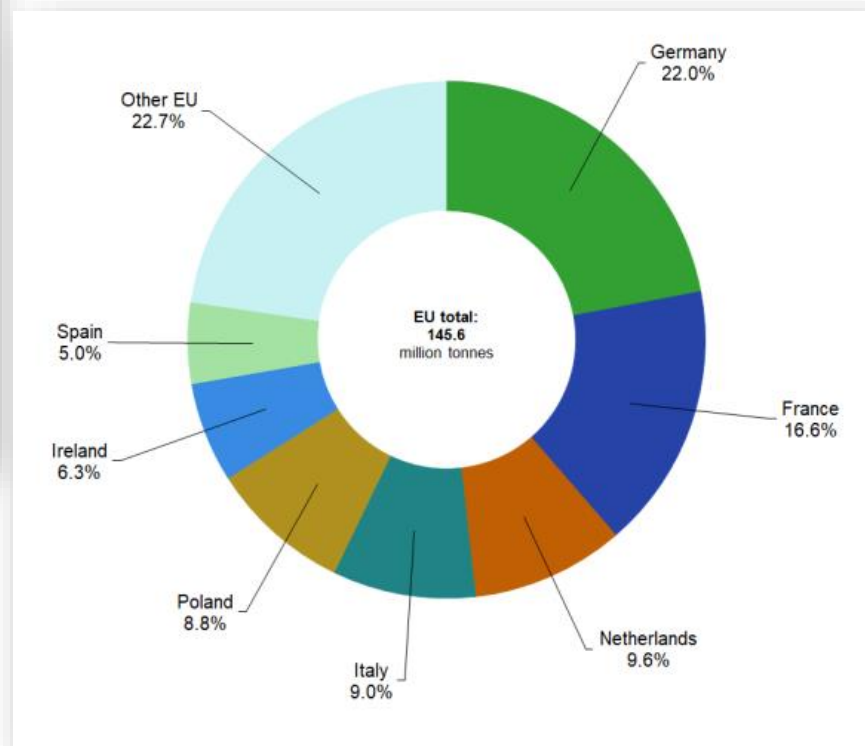
- $950 \times 10^6$  τόνοι (2023)
  - 83% αγελαδινό
  - 13% βουβαλίσιο
  - 2,6% κατσικίσιο
  - 1,2% πρόβειο



# Παραγωγή γάλακτος (α)



Top 10 in milk production



EU cow milk production



# Παραγωγή γάλακτος (β)

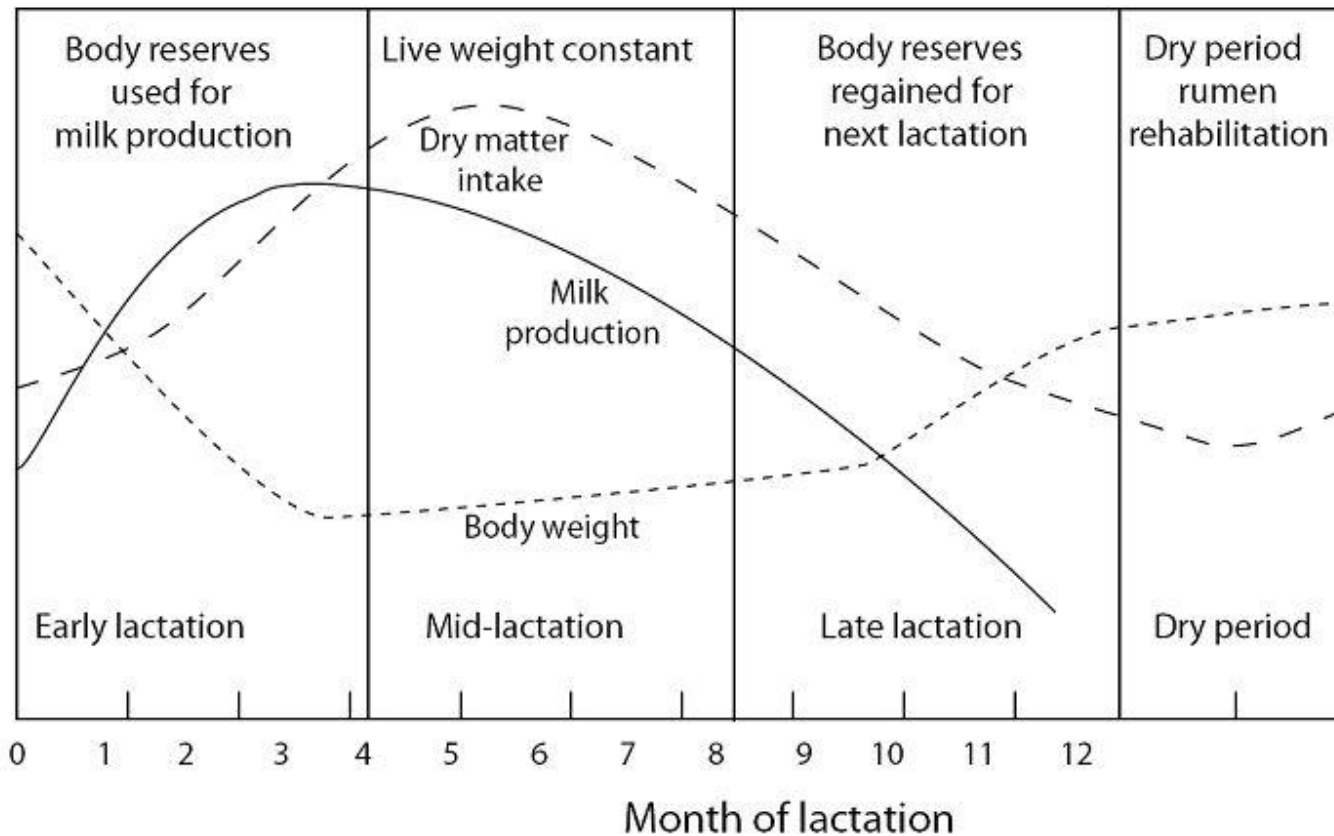
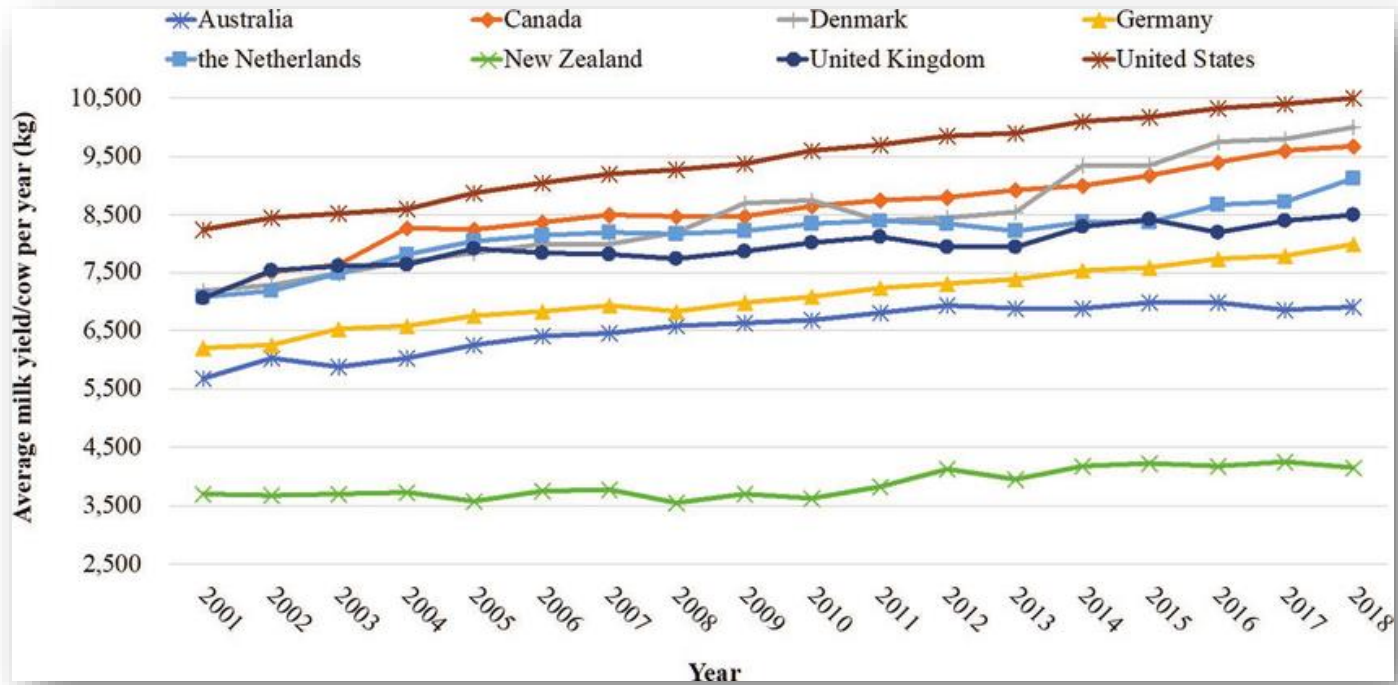


Figure 1. Dry matter intake, milk yield and live weight changes in a cow during her lactation cycle



# Παραγωγή γάλακτος (γ)

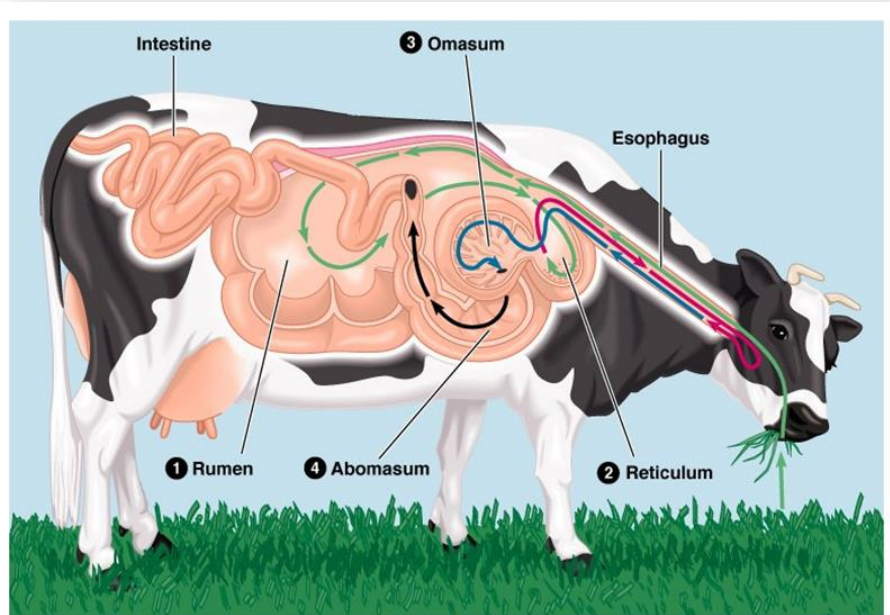
- Μαστός: εντυπωσιακό βιοσυνθετικό «εργοστάσιο»
  - Πρώτη ύλη, μη αφομοιώσιμη από το άνθρωπο,
  - παράγει ένα προϊόν υψηλής θρεπτικής αξίας
  - 5.000 lit γάλακτος = 10-12 kg φωσφορικού οξέος + 8-10 kg ασβεστίου
  - ο μηρυκαστικός χαρακτήρας του πεπτικού συστήματος σημαντικός





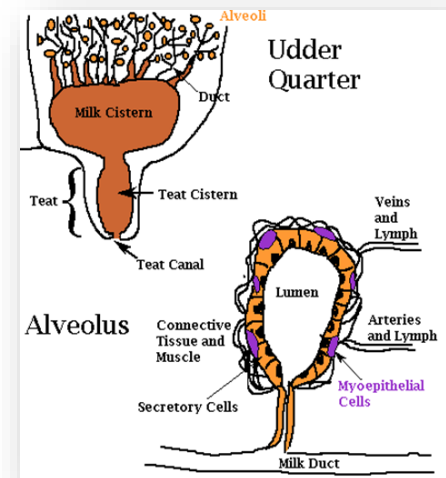


# Βιοσύνθεση του γάλακτος

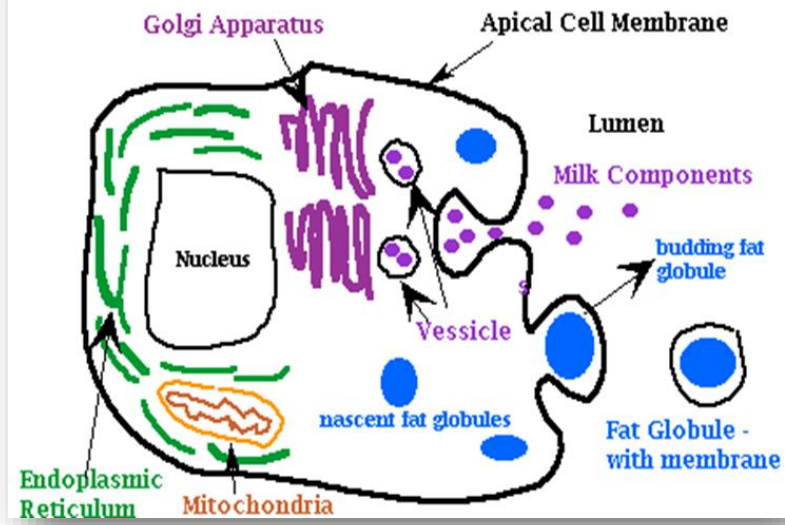


©1999 Addison Wesley Longman, Inc.

- (1) Rumen = μεγάλη κοιλία (ζύμωση)
- (2) Reticulum = κερκύφαλος (ζύμωση)
- (3) Omasum = εχίνος (πέψη)
- (4) Abomasum = ήνυστρο (πέψη)



## Secretory Cell





# Σύσταση γάλακτος

## Μέση σύσταση του αγελαδινού γάλακτος

	Μέση σύσταση (%)	Μέγεθος (διάμετρος, nm)	Αριθμός / ml
Νερό	86.6		
Λίπος	4.1	2000-6000 (λιποσφαίρια)	$10^{10}$
Πρωτεΐνες - καζεΐνες	3.6	30-300 (μικκύλια)	$10^{14}$
Πρωτεΐνες - ορρού		4-6 (μόρια)	$10^{17}$
Λακτόζη	5.0	0.5 (μόρια)	$10^{19}$
Τέφρα	5.0		



# Λίπος γάλακτος (α)

- Η συγκέντρωση εξαρτάται από:
  - την φυλή του ζώου,
  - το ίδιο το ζώο,
  - το στάδιο της γαλακτικής περιόδου,
  - την ποιότητα και την ποσότητα της διατροφής,
  - τη συχνότητα των αμέλξεων,
  - την ύπαρξη ή όχι μαστίτιδας.



# Λίπος γάλακτος (β)

Οι δύο κύριες φυλές στην παραγωγή αγελαδινού γάλακτος



**Friesian-Holstein** λίπος 3.5%

Συγχρονισμένη αγελαδοτροφία:

το λίπος κυμαίνεται

από 3%

(έναρξη γαλακτικής περιόδου)

μέχρι > 4.5%

(τέλος γαλακτικής περιόδου)



**Jersey-Guernsey** λίπος 6%



# Σύσταση λίπους γάλακτος

Η σύσταση του λίπους του γάλακτος.

Λιπίδιο	Ποσοστό βάρους (%)	g/l
<b>Τριγλυκερίδια</b>	<b>95.80</b>	<b>30.70</b>
Διγλυκερίδια	2.25	0.72
Μονογλυκερίδια	0.08	0.03
Ελεύθερα λιπαρά οξέα	0.28	0.09
<b>Φωσφολιπίδια</b>	<b>1.11</b>	<b>0.36</b>
Χοληστερόλη	0.46	0.15
Εστέρες χοληστερόλης	0.02	0.006



# Τριγλυκερίδια του γάλακτος

Τύπος	Άτομα άνθρακα	Είδη λιπαρών οξέων			mole %
Κεκορεσμένα τριγλυκερίδια (σύνολο)					<b>32.4</b>
	34	4:0	14:0	16:0	3.1
	36	4:0	16:0	16:0	3.2
	38	4:0	16:0	18:0	2.5
Μονο-ακόρεστα τριγλυκερίδια (σύνολο)					<b>32.6</b>
	38	4:0	16:0	18:1	4.2
	40	6:0	16:0	18:1	2.0
	48	14:0	16:0	18:1	2.8
	50	16:0	16:0	18:1	2.3
	52	16:0	16:0	18:1	2.2
Δι-ακόρεστα τριγλυκερίδια (011) (σύνολο)					<b>10.6</b>
Δι-ακόρεστα τριγλυκερίδια (002) (σύνολο)					<b>2.5</b>
Πολυ-ακόρεστα τριγλυκερίδια (όλοι οι τύποι) (σύνολο)					<b>5.2</b>



# Λιπαρά οξέα του γάλακτος (α)

Τα κυριότερα λιπαρά οξέα του γάλακτος

Λιπαρό οξύ	Ποσοστό βάρους (%)	Λιπαρό οξύ	Ποσοστό βάρους (%)
<b>4:0</b>	<b>3.8</b>	15:0	1.1
6:0	2.4	<b>16:0</b>	<b>43.7</b>
8:0	1.4	16:1	2.6
10:0	3.5	18:0	11.3
12:0	4.6	<b>18:1</b>	<b>11.3</b>
<b>14:0</b>	<b>12.8</b>	<b>18:2</b>	<b>1.5</b>
14:1	1.6		



# Λιπαρά οξέα του γάλακτος (β)

- **Το βουτυρικό οξύ (C4):**

- αναγωγή του β-υδροξυ-βουτυρικού οξέος.
- β-υδροξυ-βουτυρικό οξύ από τις διαιτητικές ίνες της τροφής του ζώου με τη δράση των βακτηρίων της μεγάλης κοιλίας (rumen).
- η συγκέντρωση έχει μεγάλες διακυμάνσεις ανάλογα με τη τροφή του ζώου.

- **Τα ακόρεστα λιπαρά οξέα:**

- ελαϊκό (cis, 18:1), λινελαϊκό (cis, 18:2) και βακκενικό (trans, 18:2).
- προϊόντα της υδρογόνωσης του λινολενικού (cis, 18:3) της τροφής.
- λαμβάνει χώρα στη μεγάλη κοιλία των μηρυκαστικών.





# Λιπαρά οξέα του γάλακτος (γ)

- **Συζευγμένο λινελαϊκό οξύ (CLA, conjugated linoleic acid):**
  - κυρίως το C18: 9-cis,11-trans
  - ευεργετική επίδραση στην υγεία του ανθρώπου
    - αντικαρκινογόνος δράση,
    - παρεμπόδιση σχηματισμού αθηρωματικής πλάκας,
    - ενίσχυση ανοσοποιητικού

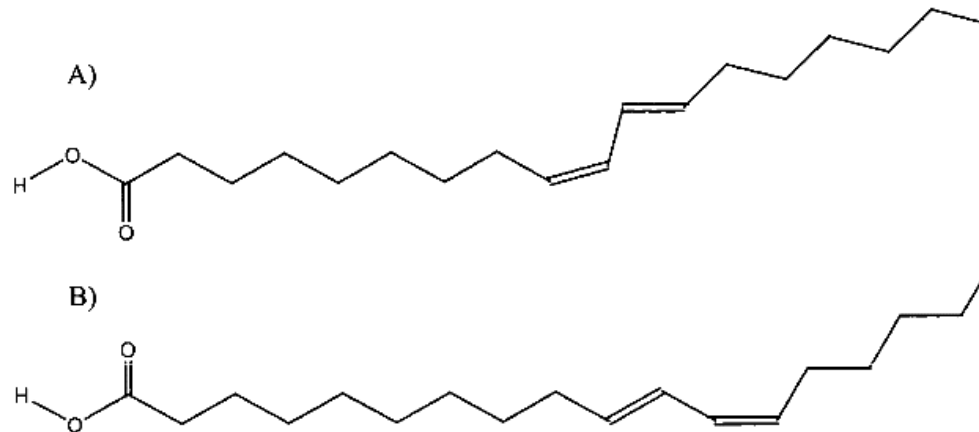
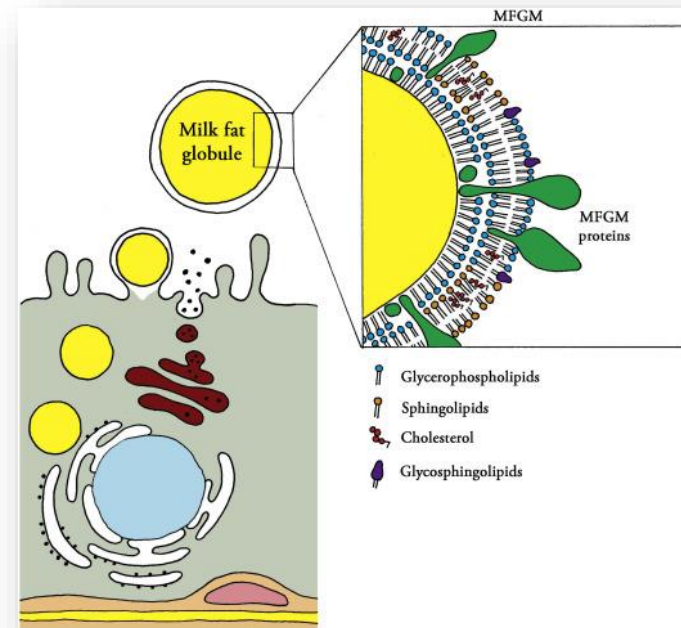


Figure 3. Chemical structures of *cis*-9, *trans*-11 CLA (A) and *trans*-10, *cis*-12 CLA (B).



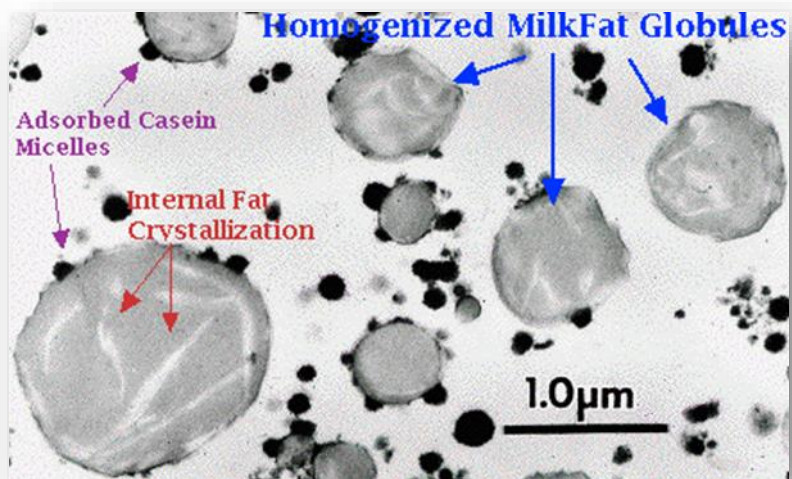
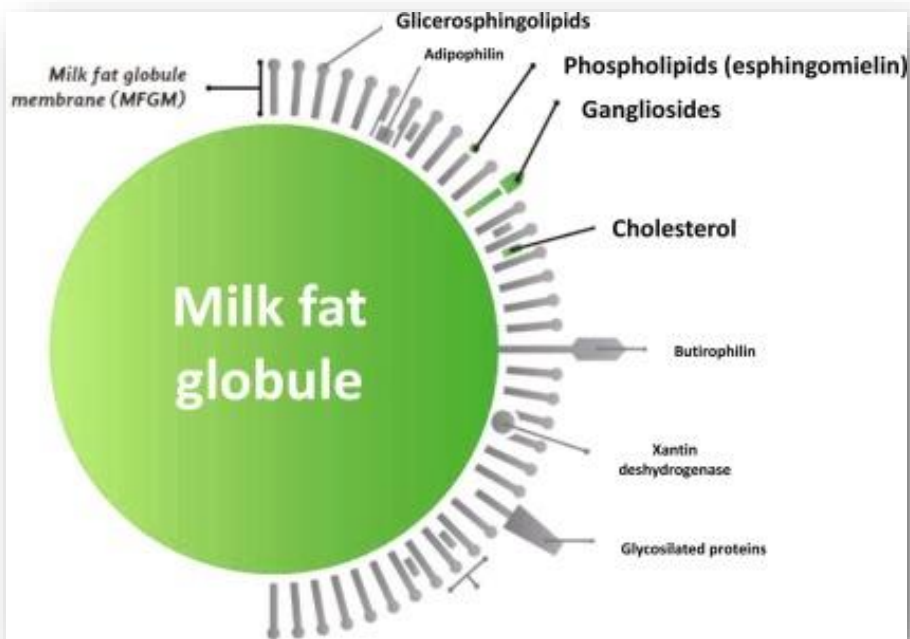
# Λιποσφαίρια (α)

- Το λίπος του γάλακτος είναι οργανωμένο υπό μορφή λιποσφαιρίων  $\varnothing$  2-6  $\mu\text{m}$ .
- Λιποσφαίρια:
  - τα μεγαλύτερα σωματίδια του γάλακτος.
  - υπεύθυνα για την σκέδαση του φωτός στο γάλα.
  - αποτέλεσμα η λευκή, κρεμώδης μορφή του πλήρους γάλακτος.
  - ο πυρήνας τους αποτελείται αποκλειστικά σχεδόν από τριγλυκερίδια.
  - περιβάλλονται από μεμβράνη.





# Λιποσφαίρια (β)





# Αποκορύφωση λίπους

## Τύπος του Stokes

$$V = \frac{2}{9} \times \frac{(d - d') \times r^2 \times g}{\eta}$$

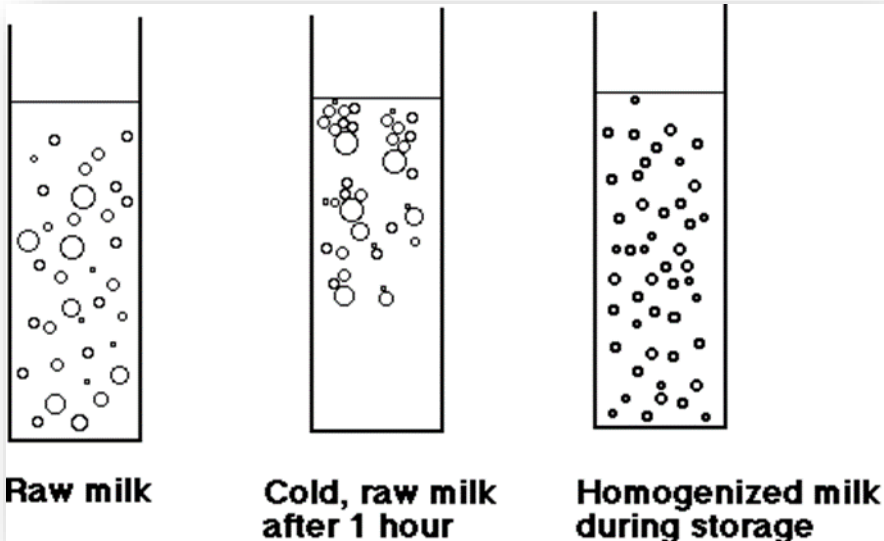
$V$  = ταχύτητα καταβύθισης.

$d$  = πυκνότητα λίπους.

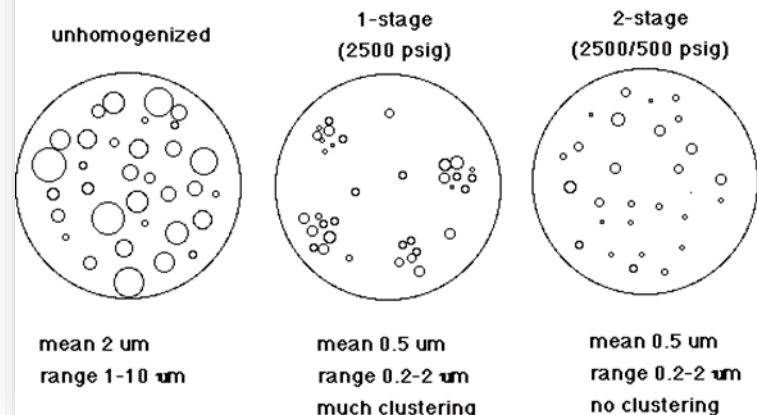
$d'$  = πυκνότητα μέσου διασποράς.

$r^2$  = ακτίνα λιποσφαιρίων.

$\eta$  = συντελεστής ιξώδους μέσου διασποράς.



## The Effects of 2-stage Homogenization on Fat Globule Size Distribution as Seen Under the Light Microscope





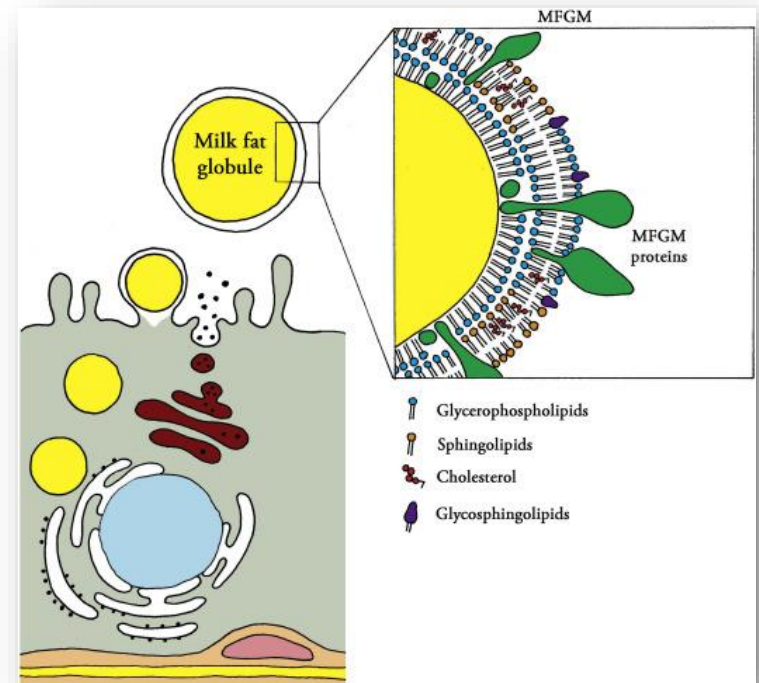
# Μεμβράνη λιποσφαιρίων (α)

- σημαντική για την σταθερότητα της λιπαρής φάσης.
- σημαντική για τις μεταβολές κατά την επεξεργασία του γάλακτος.
- προέρχεται από την κυτταρική μεμβράνη των επιθηλιακών κυττάρων.
- δημιουργείται κατά την μεταφορά του λίπους στην αδενοκυψελίδα.
- έχει σύσταση κυτταρικής μεμβράνης.



# Μεμβράνη λιποσφαιρίων (β)

- 70% των φωσφολιπιδίων και το 85% της χοληστερόλης του γάλακτος.
- μεμβρανικές πρωτεΐνες:
  - αλκαλική φωσφατάση,
  - οξειδάση της ξανθίνης,
  - 5'-νουκλεοτιδάση,
  - σουλφυρδυλική οξειδάση,
  - φωσφοδιεστεράση.





# Βιοσύνθεση λίπους γάλακτος (α)

- στο ενδοπλασματικό δίκτυο των επιθηλιακών κυττάρων.
- το λίπος κατευθύνεται προς το κυτταρόπλασμα
- οργανώνεται σε λιποσωματίδια.
- τα λιποσωματίδια οδεύουν προς το άνω άκρο των επιθηλιακών κυττάρων.
- περιβάλλονται από ένα στρώμα κυτταρικής μεμβράνης.
- μεταφέρονται στην αδenoκυψελίδα του αδενικού λοβίου.



# Βιοσύνθεση λίπους γάλακτος (β)

de novo βιοσύνθεση  
C6-C14 & 50% C16

από το λίπος της τροφής  
50% C16 και 100% C18

τριγλυκερίδια αίματος

λιποπρωτεΐνη λιπάση

απολιποπρωτεΐνη C-II

τριγλυκερίδια μαστού

ελεύθερα  
C16-C18  
στο μαστό





# Βιοσύνθεση λιπαρών οξέων

Κύριες αντιδράσεις της βιοσύνθεσης των λιπαρών οξέων

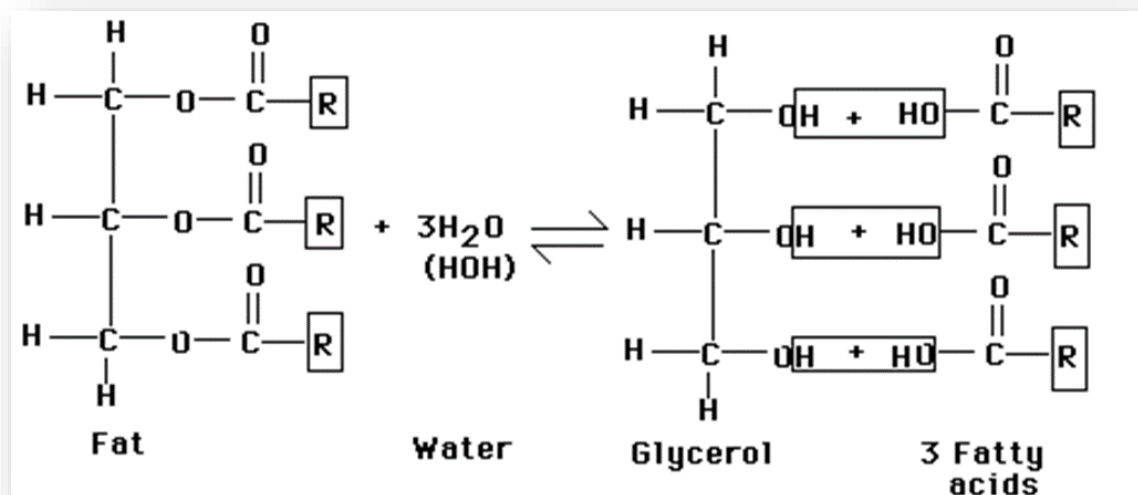
	Αντίδραση	Ένζυμο
1	$\text{ακέτυλο-CoA} + \text{HCO}_3^- + \text{ATP} \rightarrow \text{μηλότυλο-CoA} + \text{ADP} + \text{P}_i + \text{H}^+$	Καρβοξυλάση του ακέτυλο-CoA
2	$\text{ακέτυλο-CoA} + \text{ACP} \leftrightarrow \text{ακέτυλο-ACP} + \text{CoA}$	Ακετυλο-τρανσακυλάση
3	$\text{μηλότυλο-CoA} \leftrightarrow \text{μηλότυλο-ACP} + \text{CoA}$	Μηλονυλοτ-ρανσακυλάση
4	$\text{ακέτυλο-ACP} + \text{μηλότυλο-ACP} \rightarrow \text{ακετοακέτυλο-ACP} + \text{ACP} + \text{CO}_2$	Ένζυμο συμπύκνωσης του ακυλο-μηλότυλο-ACP
5	$\text{ακετοακέτυλο-ACP} + \text{NADPH} + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{D-3-υδροξυ-βουτύρυλο-ACP} + \text{NADP}^+$	Αναγωγάση του β-κετο-άκυλο-ACP
6	$\text{D-3-υδροξυ-βουτύρυλο-ACP} \leftrightarrow \text{κροτότυλο-ACP} + \text{H}_2\text{O}$	Δεϋδρατάση του 3-υδροξυ-άκυλο-ACP
7	$\text{κροτότυλο-ACP} + \text{NADPH} + \text{H}^+ \rightarrow \text{βουτύρυλο-ACP} + \text{NADP}^+$	Αναγωγάση του ενόϋλο-ACP



# Βiosύνθεση λιπιδίων (α)

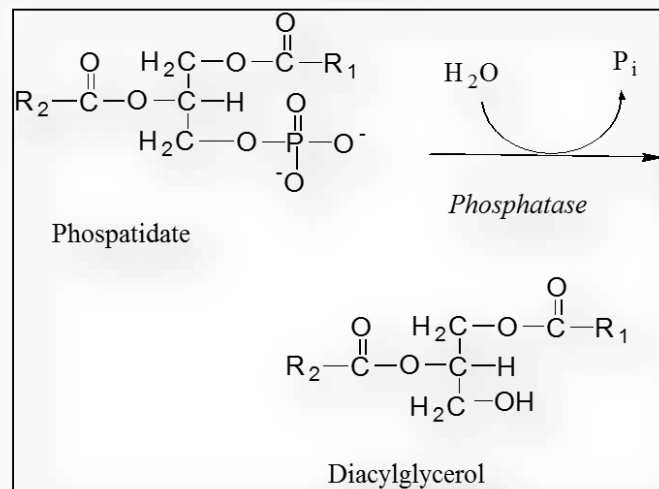
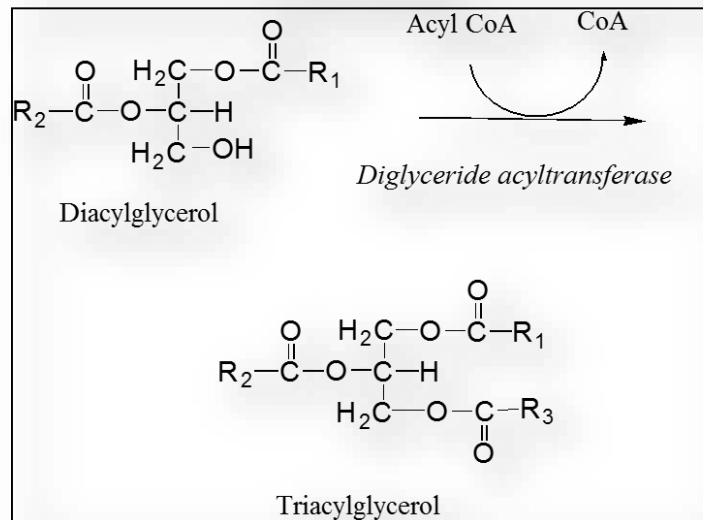
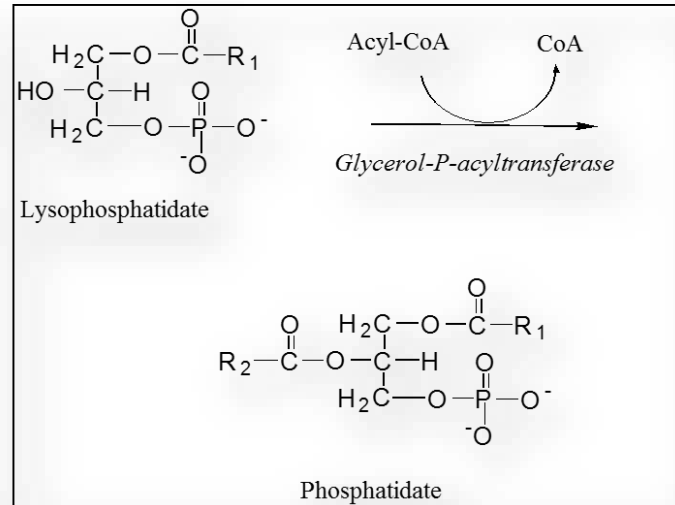
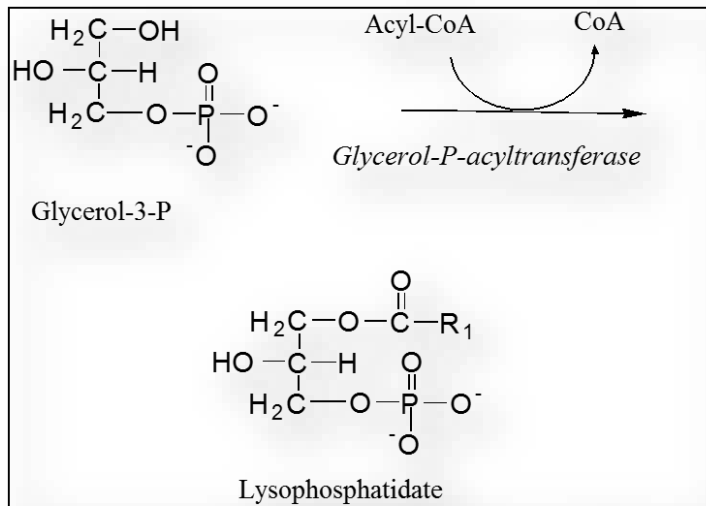
## ● Ακυλοτρανσφεράσες

- εξειδικευμένα ένζυμα.
- καταλύουν την ακυλίωση (εστεροποίηση) ΟΗ-ομάδων της γλυκερόλης.
- μεγάλου μήκους άκυλο-CoA μεταφέρεται στις θέσεις *sn*-1 & *sn*-2 γλυκερόλης.
- μικρού μήκους άκυλο-CoA μεταφέρεται στη θέση *sn*-3 γλυκερόλης.





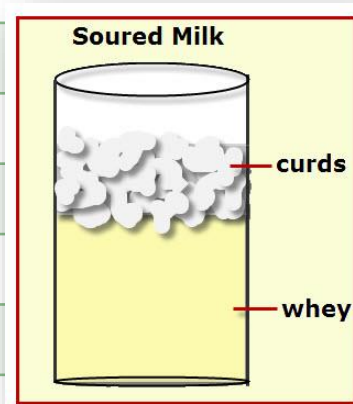
# Βiosύνθεση λιπιδίων (β)





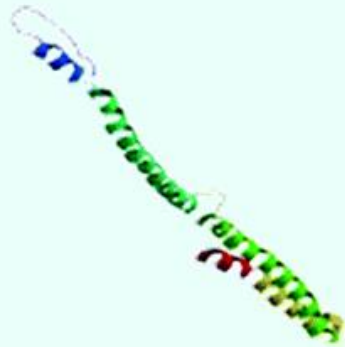
# Πρωτεΐνες του γάλακτος (α)

Πρωτεΐνη	g/l	% ολικής πρωτεΐνης
<b>Καζεΐνες</b>	24-28	<b>80</b>
α <sub>s</sub> -καζεΐνες	15-19	42
α <sub>s</sub> 1	12-15	34
α <sub>s</sub> 2	3-4	8
β-καζεΐνη	9-11	25
κ-καζεΐνη	3-4	9
γ-καζεΐνη	1-2	4
<b>Πρωτεΐνες του ορού</b>	5-7	<b>20</b>
β-λακτογλοβουλίνη	2-4	9
α-λακταλβουμίνη	1-1,5	4
Πρωτεόζες-πεπτόνες	0,6-1,8	4
Πρωτεΐνες αίματος		
Πρωτεΐνη του ορού	0,1-0,4	1
Ανοσοσφαιρίνες	0,6-1	1
<b>Σύνολο</b>		<b>100</b>





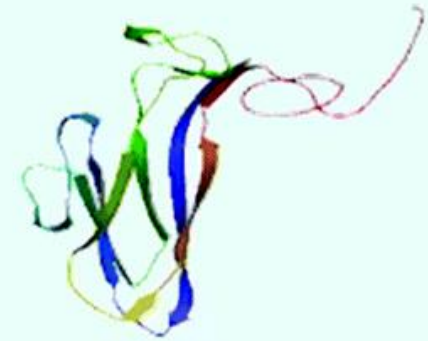
# Πρωτεΐνες του γάλακτος ( $\beta$ )



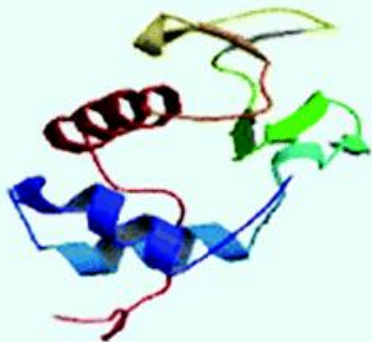
$\alpha_s$ -Casein



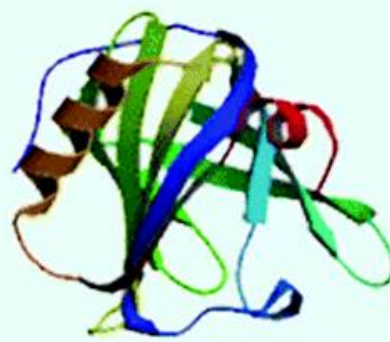
$\beta$ -Casein



$\kappa$ -Casein



$\alpha$ -Lactalbumin



$\beta$ -Lactoglobulin



Bovine Serum Albumin



# Βιοσύνθεση πρωτεϊνών (α)

- *de novo*:
  - καζεΐνες,
  - β-λακτογλοβουλίνη,
  - α-λακταλβουμίνη.
- Από το αίμα του ζώου:
  - αλβουμίνη του ορού,
  - ανοσοσφαιρίνες.
- στα ριβοσωμάτια των επιθηλιακών κυττάρων.
- πρώτη ύλη τα ελεύθερα αμινοξέα του αίματος του ζώου, τα οποία με σύστημα ενεργής μεταφοράς μεταφέρονται στα επιθηλιακά κύτταρα του μαστού.



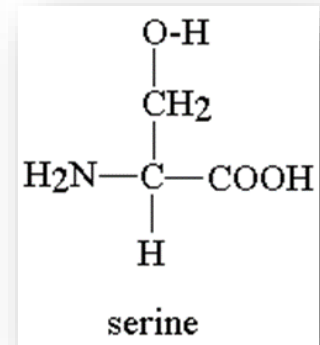
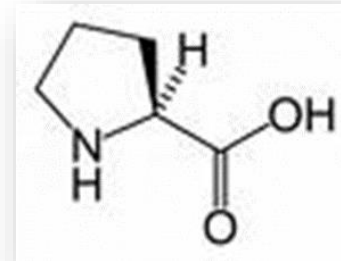
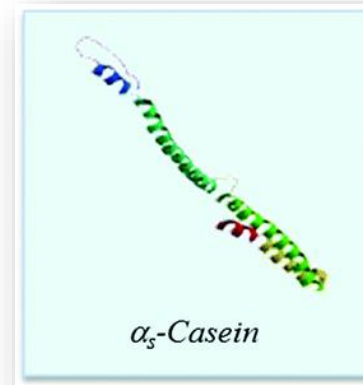
# Βιοσύνθεση πρωτεϊνών (β)

- Η βιοσύνθεση σύμφωνα με το γενικό σχήμα:
  - (DNA → mRNA → πρωτεΐνη)
- Η βιοσύνθεση ολοκληρώνεται στη συσκευή Golgi:
  - μετα-μεταφραστική τροποποίηση πρωτεϊνών
  - πρώτη εμφάνιση μικκυλίων καζεΐνης
- τα οργανίδια Golgi «τήκονται» με την κυτταρική μεμβράνη των επιθηλιακών κυττάρων
  - αδειάζουν το περιεχόμενό τους στην αδενοκυψελίδα του αδενικού λοβίου



# $\alpha_{s1}$ -καζεΐνη (α)

- 199 αμινοξέα (**17 μόρια προλίνης, 8.4%**).
- Προλίνη ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλο το μόριο.
- δύσκολος ο σχηματισμός  $\alpha$ -έλικας (δευτεροταγής δομή).
- περιοχή 41-80:
  - **8 Ser – P** (ανιονική περιοχή).
  - υψηλό αρνητικό φορτίο (-20.6 σε pH 6.6),
  - σχεδόν το συνολικό καθαρό φορτίο όλου του μορίου.







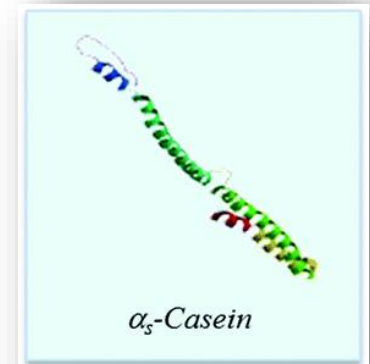
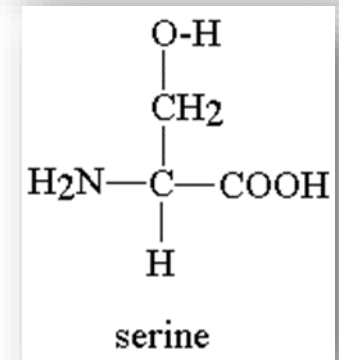
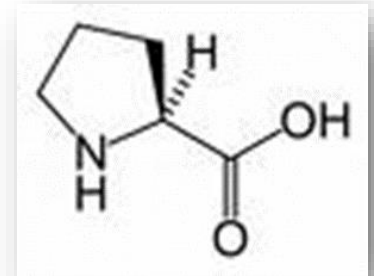
# $\alpha_{s1}$ -καζεΐνη ( $\beta$ )

- υπόλοιπο μόριο:
  - ελάχιστο καθαρό φορτίο.
  - 3 πολύ υδρόφοβες περιοχές (1-40, 90-110 και 130-199).
- αμφίφιλο μόριο:
  - υδρόφιλο και όξινου χαρακτήρα το N-άκρο.
  - υδρόφοβο το C-άκρο.
- 8 γενετικές παραλλαγές:
  - A, B, C, D, E, F, G και H.



# $\alpha_{s2}$ -καζεΐνη

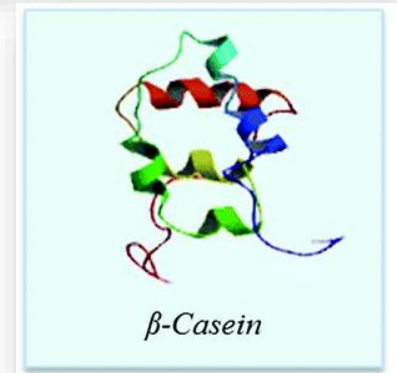
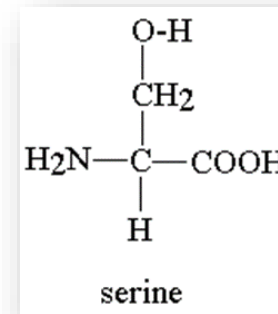
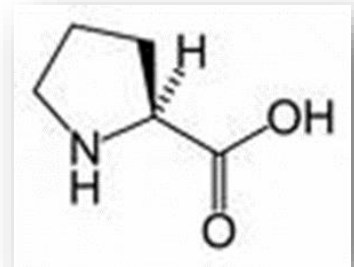
- 207 αμινοξέα (**10 μόρια προλίνης, 4.8%**).
- **11 Ser – P** σε τρεις διακριτές περιοχές (8-16, 56-61 και 129-143).
- το πιο υδρόφιλο κλάσμα καζεΐνης.
- συνολικά μικρότερο καθαρό φορτίο από την  $\alpha_{s1}$ -καζεΐνη.
- N-άκρο (68 αμινοξέα) με καθαρό αρνητικό φορτίο  $-21$ .
- περιοχή 90-120 ασθενώς υδρόφοβη.
- C-άκρο (160-207) πολύ υδρόφοβο (φορτίο  $+9.5$ ).
- 4 γενετικές παραλλαγές (A, B, C και D).





# β-καζεΐνη

- 209 αμινοξέα (**35 μόρια προλίνης, 16.7%**).
- Προλίνη ομοιόμορφα κατανεμημένη στο μόριο
- δύσκολος ο σχηματισμός δομής α-έλικας.
- η πιο υδρόφοβη καζεΐνη.
- N-άκρο (1-21):
  - **4 εκ των συνολικά 5 Ser – P,**
  - ισχυρά αρνητικά φορτισμένο (-11.5).
- υπόλοιπο μόριο (ιδιαίτερα το C-άκρο):
  - υδρόφοβο.
- 9 γενετικές παραλλαγές:
  - A1, A2, A3, B, C, D, E, F και G.





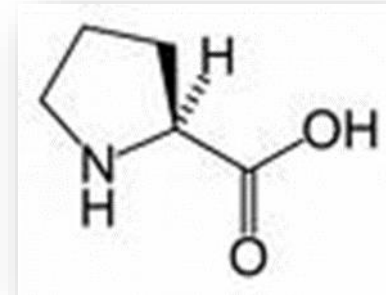
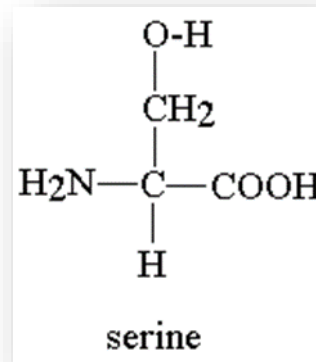
# γ-καζεΐνη

- προϊόν της υδρόλυσης του C-άκρου της β-καζεΐνης από την πλασμίνη.
- πλασμίνη = ενδογενής πρωτεΐνάση του γάλακτος.
- υδρόλυση πριν ή μετά την άμελξη.
- παράγει 6 πολυπεπτίδια:
  - τα γ1, γ2 & γ3 που κλασματοποιούνται με τις καζεΐνες
  - οι πρωτεόζες-πεπτόνες κλασματοποιούνται με τον ορρό



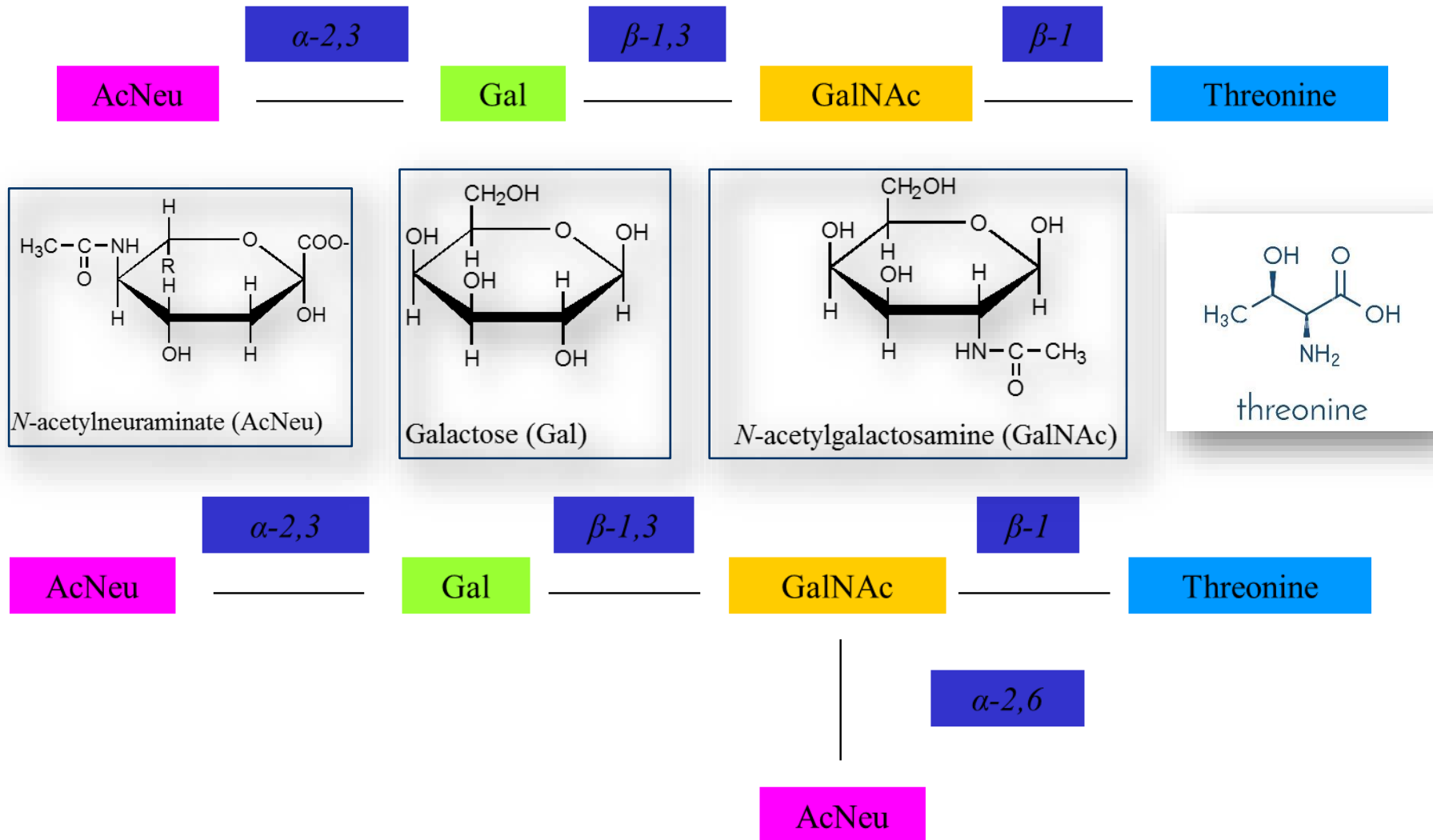
# κ-καζεΐνη (α)

- 169 αμινοξέα (20 μόρια προλίνης, 11.8%).
- 1 μόνο Ser – P (Ser149)
- η πολική περιοχή:
  - Thr133 γλυκοζυλιωμένη
- υδατανθρακικό τμήμα:
  - τρισακχαρίτης ή τετρασακχαρίτης
  - N-ακετυλονευραμινικό οξύ (AcNeu)
  - Γαλακτόζη (Gal)
  - N-ακετυλογαλακτοζαμίνη (GalNAc)
- 11 γενετικές παραλλαγές:
  - A, B, C, D, E, FS, FI, GS, H, I, J





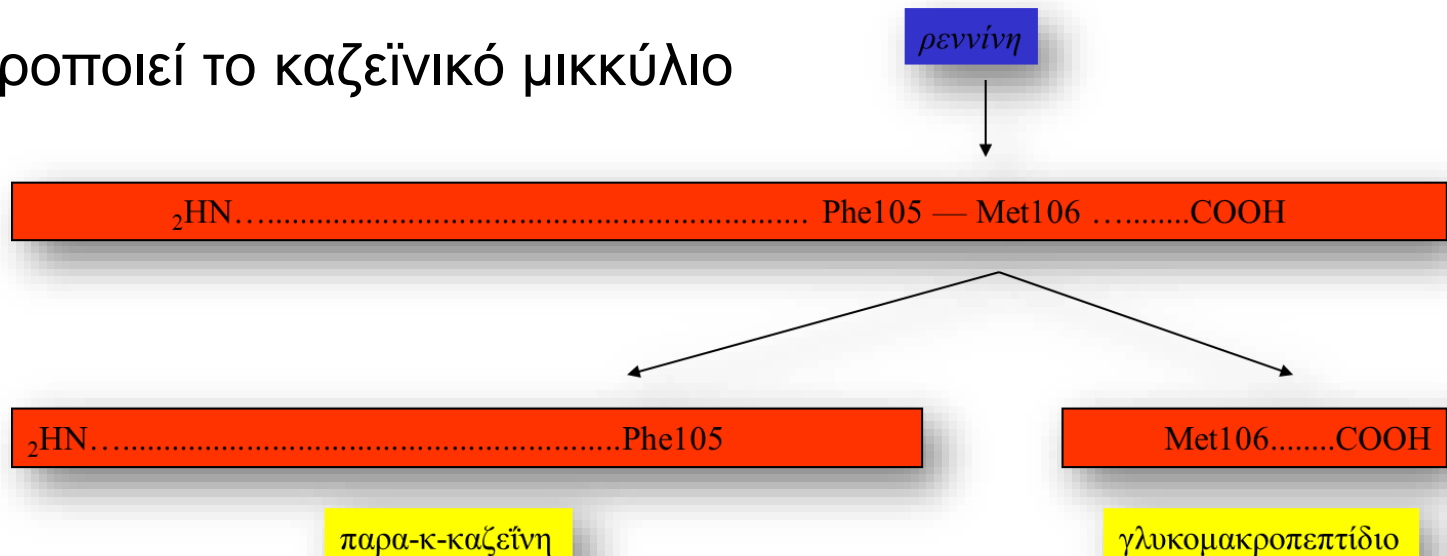
# κ-καζεΐνη (β)





# κ-καζεΐνη (γ)

- γλυκοζυλιωμένη Thr133 & φωσφορυλιωμένη Ser149 στο C-άκρο
- υπόλοιπο μόριο ισχυρά υδρόφοβο
- κ-καζεΐνη αμφίφιλο μόριο
- διαλυτή σε συγκεντρώσεις Ca που οι άλλες καζεΐνες καταβυθίζονται
- σταθεροποιεί το καζεϊνικό μικκύλιο





# Βιβλιογραφία

- B.K. Simpson (2012) Food Biochemistry and Food Processing, Wiley-Blackwell
- M.J. Berg, L.J. Tymoczko, G.J. Gato, L. Stryer (2015) Βιοχημεία, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης