

Ιόνιο Πανεπιστήμιο – Τμήμα Πληροφορικής
Αρχιτεκτονική Υπολογιστών
2023-24

Εικονική Μνήμη

(και ο ρόλος της στην ιεραρχία μνήμης)

<http://mixstef.github.io/courses/comparch/>

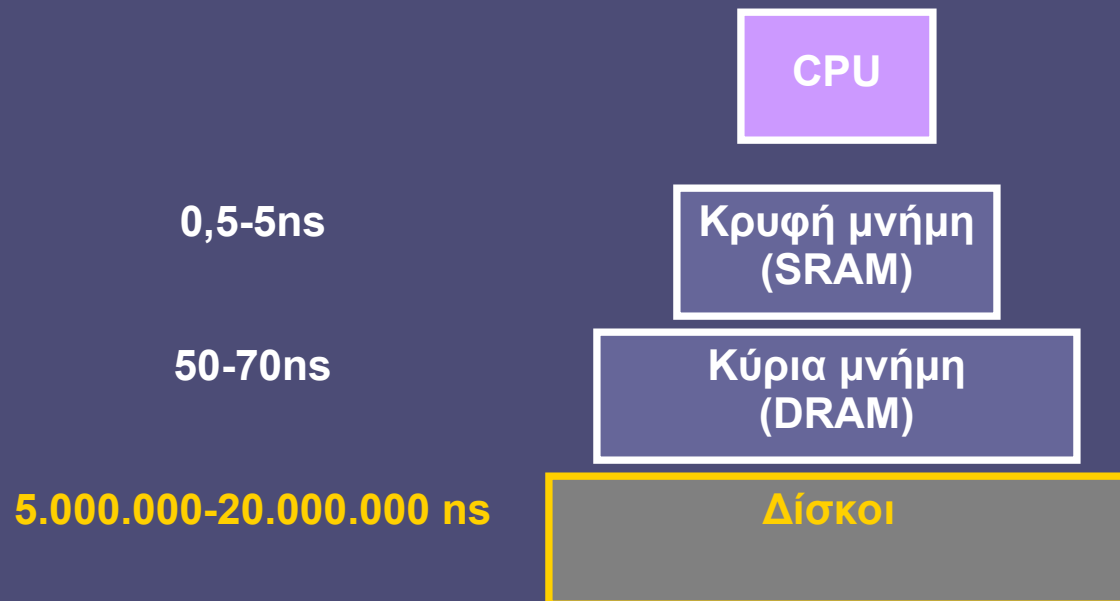
Μ.Στεφανιδάκης



Επεκτείνοντας την Ιεραρχία Μνήμης

- **Εννοιολογικά:**

- Κάθε υψηλότερο επίπεδο δρα ως «κρυφή μνήμη» για το αμέσως χαμηλότερο
 - Η κύρια μνήμη λειτουργεί ως «κρυφή μνήμη» των δίσκων
 - Τα περιεχόμενα στην κύρια μνήμη είναι **υποσύνολο** εκείνων στους δίσκους του συστήματος



Εικονική μνήμη (virtual memory)

- Για ποιον λόγο εμφανίστηκε;
 - Στους πρώτους υπολογιστές το μέγεθος της κύριας μνήμης ήταν **περιορισμένο**
 - Ακόμα και στην περίπτωση του **μονοπρογραμματισμού** η κύρια μνήμη ήταν ανεπαρκής
 - Εμφάνιση ΛΣ με υποστήριξη **πολυπρογραμματισμού**
 - Αδυναμία **ταυτόχρονης διατήρησης** πολλών προγραμμάτων στην κύρια μνήμη
- Η λύση: **εικονική μνήμη**
 - Μέρος των δεδομένων βρίσκεται στους δίσκους του συστήματος
 - Μεταφορά στην κύρια μνήμη όταν χρειαστεί
 - Πιθανότατα αντικαθιστώντας άλλα τμήματα δεδομένων
 - Τα τελευταία μεταφέρονται πίσω στους δίσκους
 - Το πρώτο σύστημα εικονικής μνήμης παρουσιάστηκε το 1962 (Atlas computer)

Χώρος διευθύνσεων προγράμματος

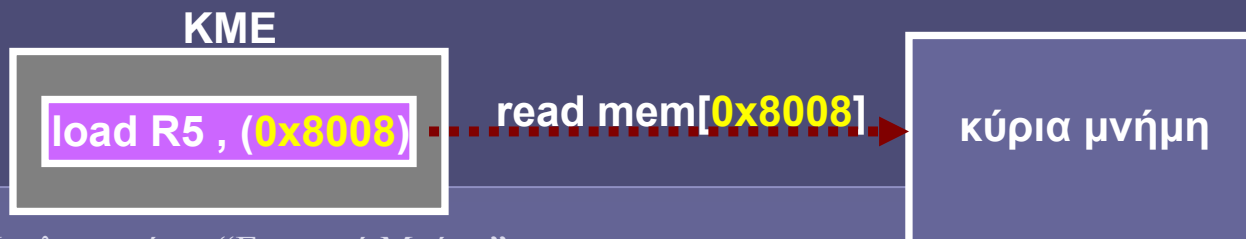
- Address Space

- Εκτελούμενο πρόγραμμα στη μνήμη:
- Διευθύνσεις κώδικα
 - Εντολές διακλάδωσης
- Διευθύνσεις δεδομένων
 - Εντολές load-store

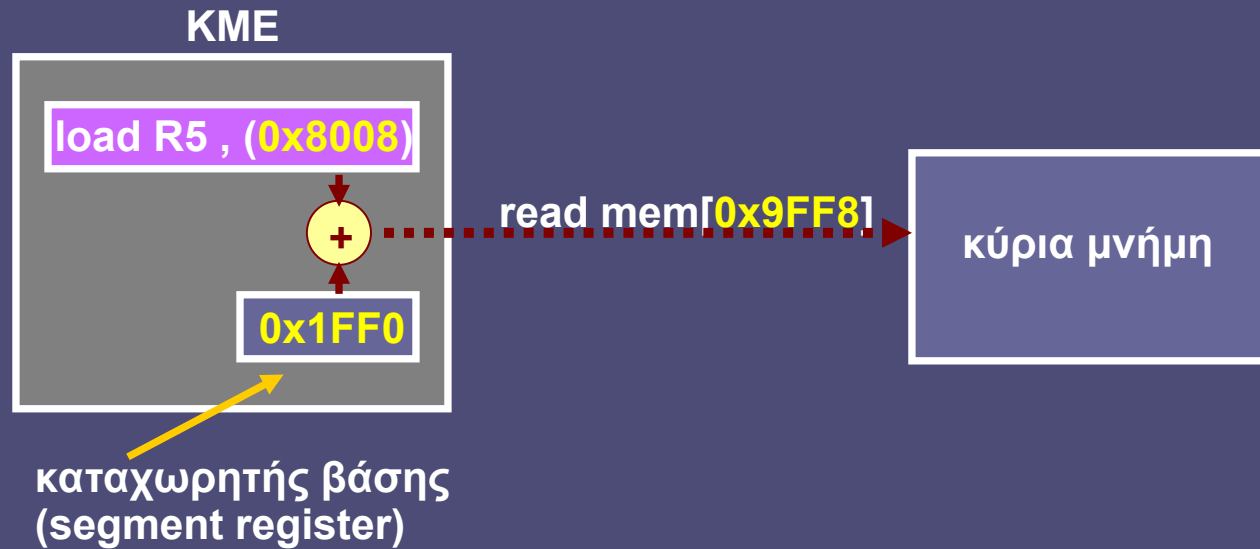
- Πριν την εικονική μνήμη:

- Κάθε πρόγραμμα χρησιμοποιούσε φυσικές διευθύνσεις της κύριας μνήμης
- Τι συνέβαινε αν το πρόγραμμα δεν φορτωνόταν πάντοτε στον ίδιο χώρο μνήμης;

Κύρια μνήμη



Πολυπρογραμματισμός πριν την εικονική μνήμη

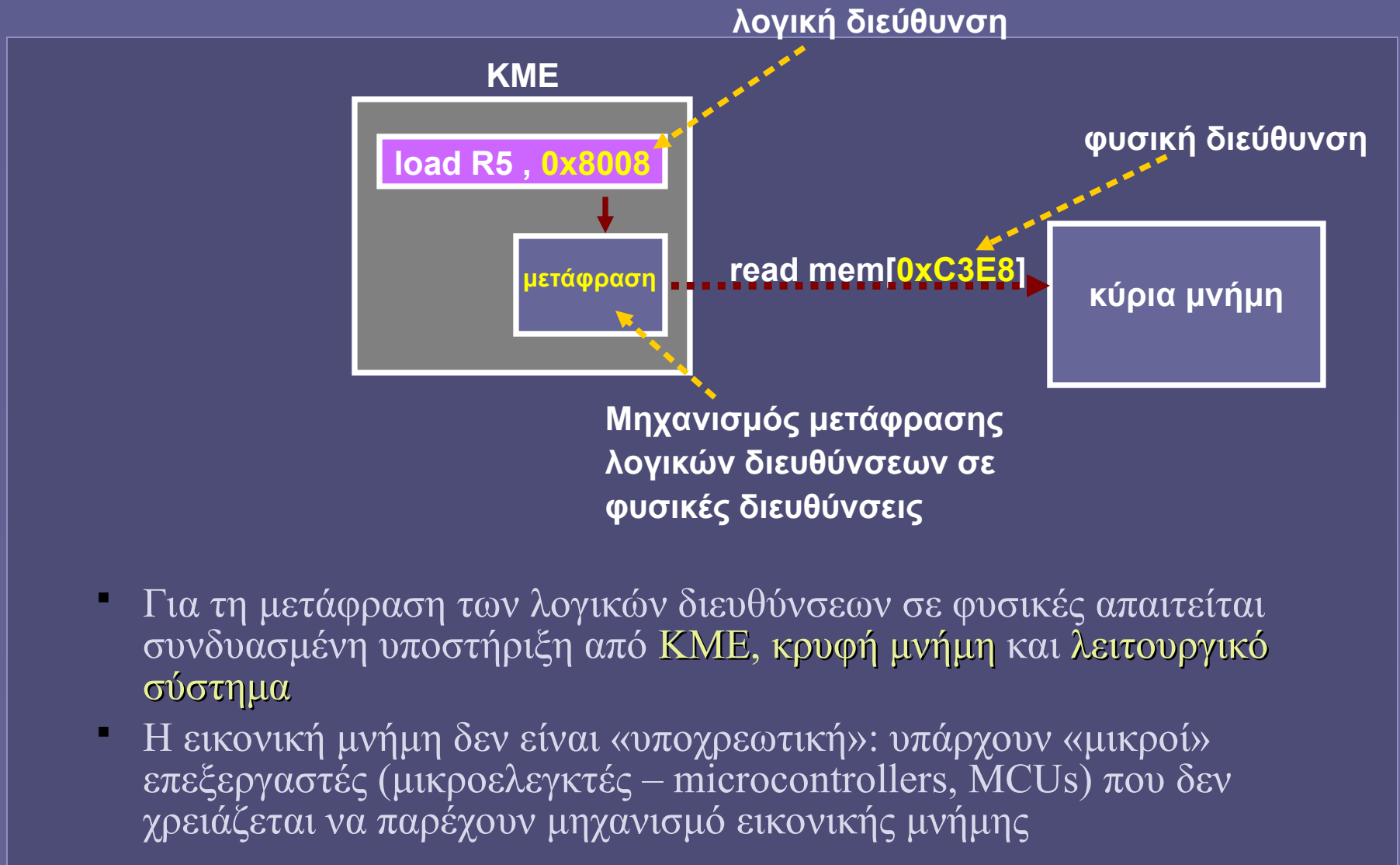


- Ειδικοί **καταχωρητές βάσης** για κώδικα και δεδομένα
 - Διευκόλυνση τοποθέτησης προγραμμάτων οπουδήποτε στη μνήμη
 - Αλλαγή τιμής καταχωρητών βάσης ανά πρόγραμμα
 - Δεν λύνεται το θέμα της ανεπαρκούς μνήμης
 - Ένα πρώτο βήμα προς τις εικονικές διευθύνσεις

Μεταβαίνοντας σε λογικές διευθύνσεις

- Το προηγούμενο σχήμα
 - Εισήγαγε την **αποσύνδεση** των **λογικών (εικονικών) διευθύνσεων** των προγραμμάτων από τις **φυσικές διευθύνσεις** κύριας μνήμης
 - Με απλή αντιστοιχία:
φυσική διεύθυνση = λογική διεύθυνση + καταχωρητής βάσης
 - Απαιτείται υποστήριξη από το υλικό (ΚΜΕ)
 - Το πρόγραμμα μπορεί να φορτωθεί σε οποιαδήποτε θέση μνήμης (**relocation**)
 - Δεν περιέχει αναφορές σε φυσικές διευθύνσεις
 - Εισάγεται η έννοια των ξεχωριστών χώρων διευθύνσεων (κώδικα, δεδομένων...) ανά πρόγραμμα
 - χωρίς περαιτέρω υποστήριξη

Λογικές (εικονικές) διευθύνσεις: η γενική ιδέα



Σύστημα εικονικής μνήμης

- **Ποιος ο ρόλος ενός συστήματος εικονικής μνήμης;**
 - Η δυνατότητα χρήσης εικονικής μνήμης πέρα από όση είναι πραγματικά διαθέσιμη και η διευκόλυνση του πολυπρογραμματισμού
 - Ο αρχικός λόγος για τη χρήση της εικονικής μνήμης
 - Η υλοποίηση μηχανισμών προνομίων προσπέλασης μνήμης από κάθε διεργασία και η προστασία των δεδομένων μεταξύ διαφορετικών διεργασιών
 - Σημαντικότερο σήμερα, ιδίως στο cloud computing!
- **Ποιος διαχειρίζεται την εικονική μνήμη;**
 - Διαχείριση από το λειτουργικό σύστημα
 - Υποστήριξη από το υλικό (ΚΜΕ/κρυφή μνήμη)

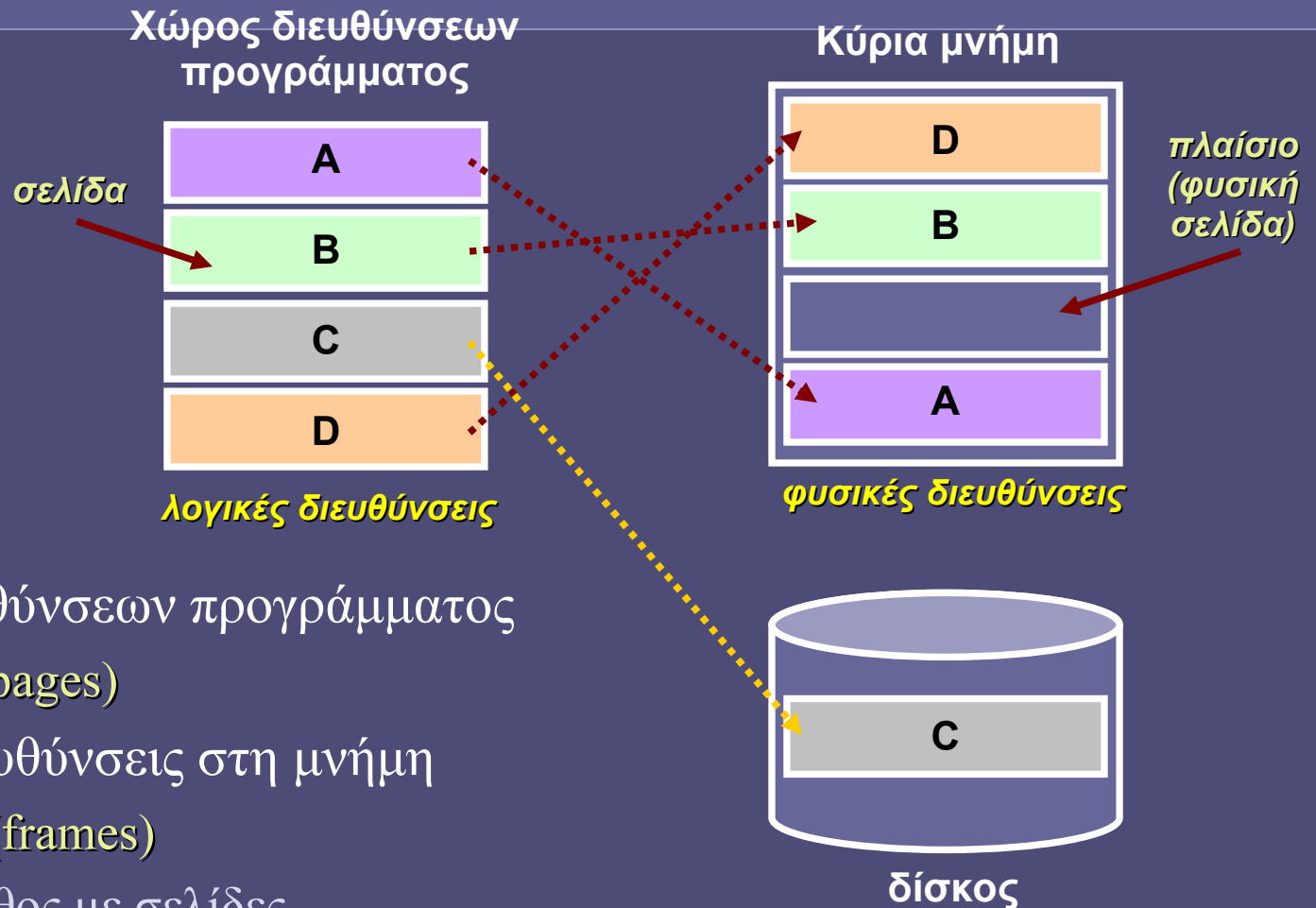
Υλοποίηση εικονικής μνήμης

- **Εκμετάλλευση της αρχής της τοπικότητας**
 - Μερικά μέρη μόνο των προγραμμάτων είναι «ενεργά» κάθε στιγμή
 - Χρησιμοποιώντας μικρό μέρος από τον συνολικό χώρο διευθύνσεων τους (κώδικα και δεδομένα)
 - Το λειτουργικό σύστημα αφαιρεί από την κύρια μνήμη και τοποθετεί στους δίσκους τα τμήματα μνήμης που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί στο πρόσφατο παρελθόν
 - Συνεπώς θα χρειαστούν στο άμεσο μέλλον με μικρή πιθανότητα
 - Η διαχείριση της εικονικής μνήμης έχει ομοιότητες με τη διαχείριση **κρυφής-κύριας μνήμης**
 - Η διαφορά στο κόστος προσπέλασης όμως μεταξύ κύριας μνήμης – δίσκων είναι πολύ μεγαλύτερη (100.000 φορές και πλέον) από το κόστος προσπέλασης κρυφής – κύριας μνήμης

Σελιδοποίηση (paging)

- Ο χώρος λογικών διευθύνσεων κάθε προγράμματος χωρίζεται σε σελίδες (pages)
 - Συγκεκριμένα μεγέθη σελίδας (4KB, 2MB, 1GB)
 - 4KB είναι το «κλασικό μέγεθος», ταιριάζει με το μπλοκ μεταφοράς δεδομένων από/προς δίσκους
 - Μεγαλύτερο μέγεθος (=λιγότερες σελίδες ανά πρόγραμμα) → λιγότεροι πόροι για διαχείριση
 - Αλλά και αύξηση του αχρησιμοποίητου χώρου
- Η κύρια μνήμη (φυσικές διευθύνσεις) χωρίζεται σε φυσικές σελίδες (ή πλαίσια, frames) με μέγεθος ίσο με της σελίδας
 - Κάθε σελίδα τοποθετείται σε ένα ελεύθερο πλαίσιο
 - Ευκολία τοποθέτησης και αντικατάστασης σελίδων στην κύρια μνήμη

Βασικό σχήμα σελιδοποίησης



- Χώρος διευθύνσεων προγράμματος
 - Σελίδες (pages)
- Φυσικές διευθύνσεις στη μνήμη
 - Πλαίσια (frames)
 - Ίδιο μέγεθος με σελίδες
 - Κάποιες σελίδες μπορεί να βρίσκονται στον δίσκο

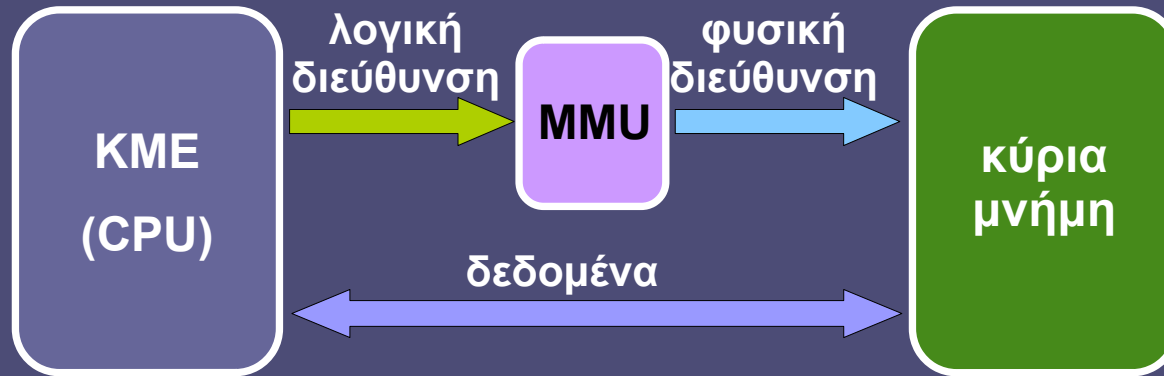
Σελιδοποίηση κατ' απαίτηση (demand paging)

- Οι σελίδες των προγραμμάτων (κώδικας-δεδομένα) βρίσκονται αρχικά μόνο στον δίσκο
 - Το ΛΣ τις σημειώνει ως “απούσες” από τη μνήμη
- Όταν η εκτελούμενη εντολή προσπελάσει δεδομένα από μια “απούσα” σελίδα, δημιουργείται ένα σφάλμα σελιδοποίησης (page fault) και το ΛΣ τη φορτώνει σε ένα πλαίσιο στη μνήμη
 - Ενδεχομένως εκτοπίζοντας πίσω στον δίσκο μια άλλη σελίδα από τη μνήμη
- Στη συνέχεια το λειτουργικό επιστρέφει τον έλεγχο στο πρόγραμμα που προκάλεσε το σφάλμα σελιδοποίησης
 - Η εντολή που διακόπηκε εκτελείται ξανά

Κρίσιμα σημεία στη σχεδίαση εικονικής μνήμης

- Η μείωση των page faults είναι επιβεβλημένη
 - Page faults: μεγάλο κόστος σε κύκλους αναμονής (1-10Μκύκλοι)
 - Οι σελίδες τοποθετούνται οπουδήποτε μέσα στη μνήμη
 - Σχήμα ανάλογο των **fully-associative** κρυφών μνημών
- Οι σελίδες πρέπει να έχουν ικανό μέγεθος για εξισορρόπηση του κόστους προσπέλασης του δίσκου
- Η διαχείριση της εικονικής μνήμης γίνεται από το λειτουργικό σύστημα
 - Δυνατότητα χρήσης πολυπλοκότερων αλγορίθμων για τοποθέτηση-αντικατάσταση σελίδων στη μνήμη

Εικονική μνήμη: το υλικό



- Σύστημα διαχείρισης μνήμης
 - **Memory management unit – MMU**
 - Βρίσκεται μέσα στον επεξεργαστή
 - Μεταφράζει τις **λογικές** (εικονικές) διευθύνσεις κάθε προγράμματος σε **φυσικές** διευθύνσεις μνήμης
 - Από το διπλανό σχήμα απουσιάζει η κρυφή μνήμη, η οποία συνδέεται στενά με τον μηχανισμό εικονικής μνήμης

Σελίδες και λογικές (εικονικές) διευθύνσεις

Ο επεξεργαστής παράγει λογική (εικονική) διεύθυνση N bits

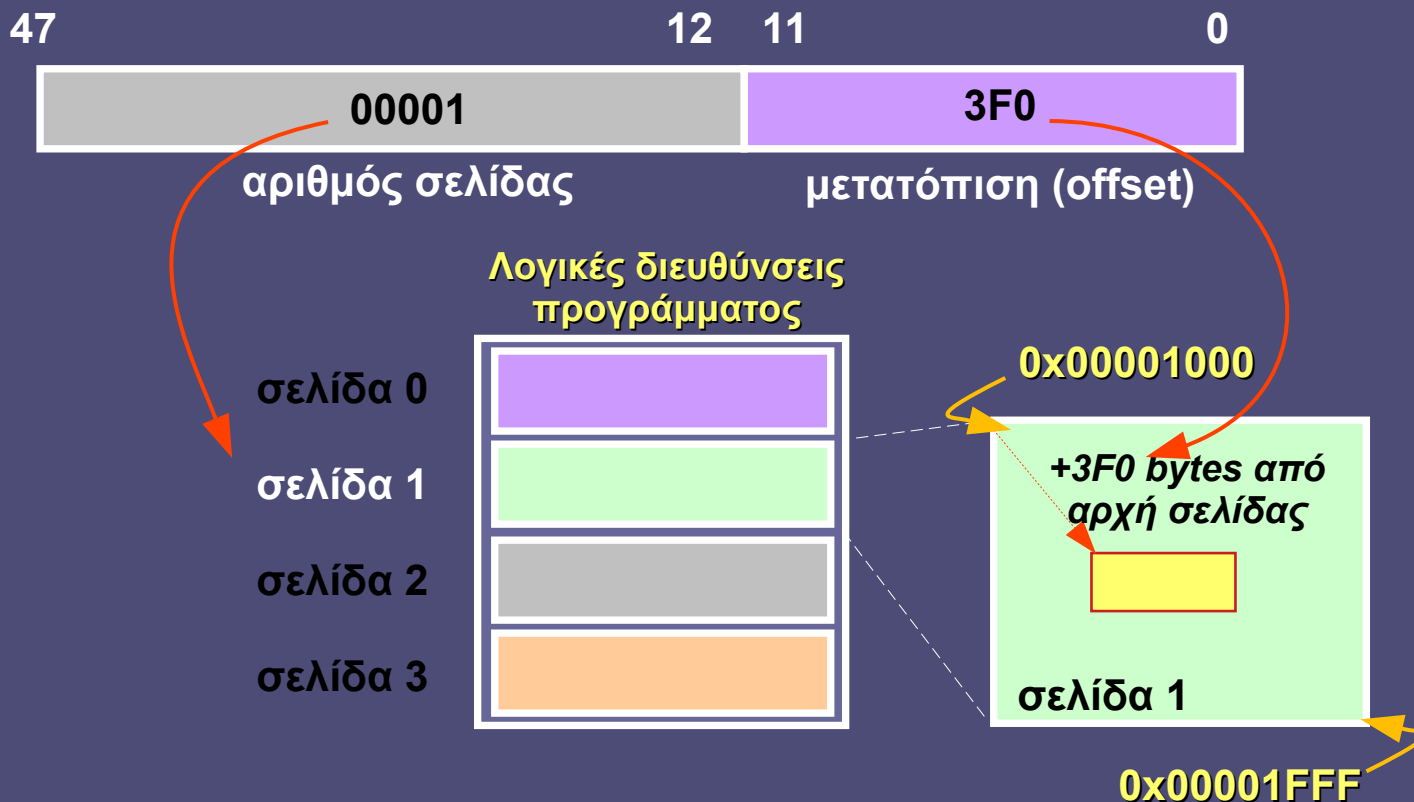


Στη μνήμη στέλνεται φυσική διεύθυνση M bits

- Ο επεξεργαστής μπορεί να παράγει έως και 2^N λογικές διευθύνσεις
- Η φυσική μνήμη μπορεί να έχει έως 2^M φυσικές διευθύνσεις
- Το μέγεθος σελίδας είναι 2^K bytes
- Τα N και M μπορούν να έχουν οποιαδήποτε σχέση
- Η μετάφραση γίνεται στον επεξεργαστή (MMU)

Παράδειγμα με μέγεθος σελίδας 4KB

Ο επεξεργαστής παράγει λογική (εικονική) διεύθυνση **0x000013F0**



- Μέγεθος σελίδας 4KB (2^{12}) $\rightarrow K = 12$
- Έστω ότι λογικές και φυσικές διευθύνσεις έχουν εύρος 48 bits $\rightarrow N = M = 48$

Παράδειγμα (συνέχεια)

Ο επεξεργαστής παράγει λογική (εικονική) διεύθυνση: **0x000013F0**



μετάφραση ↓

↓ ως έχει



Στη μνήμη στέλνεται φυσική διεύθυνση: **0x80FFF3F0**

Φυσικές διευθύνσεις
στη μνήμη

πλαίσιο 80FFF

...

...

...

0x80FFF000

+3F0 bytes από
αρχή πλαισίου

πλαίσιο 80FFF

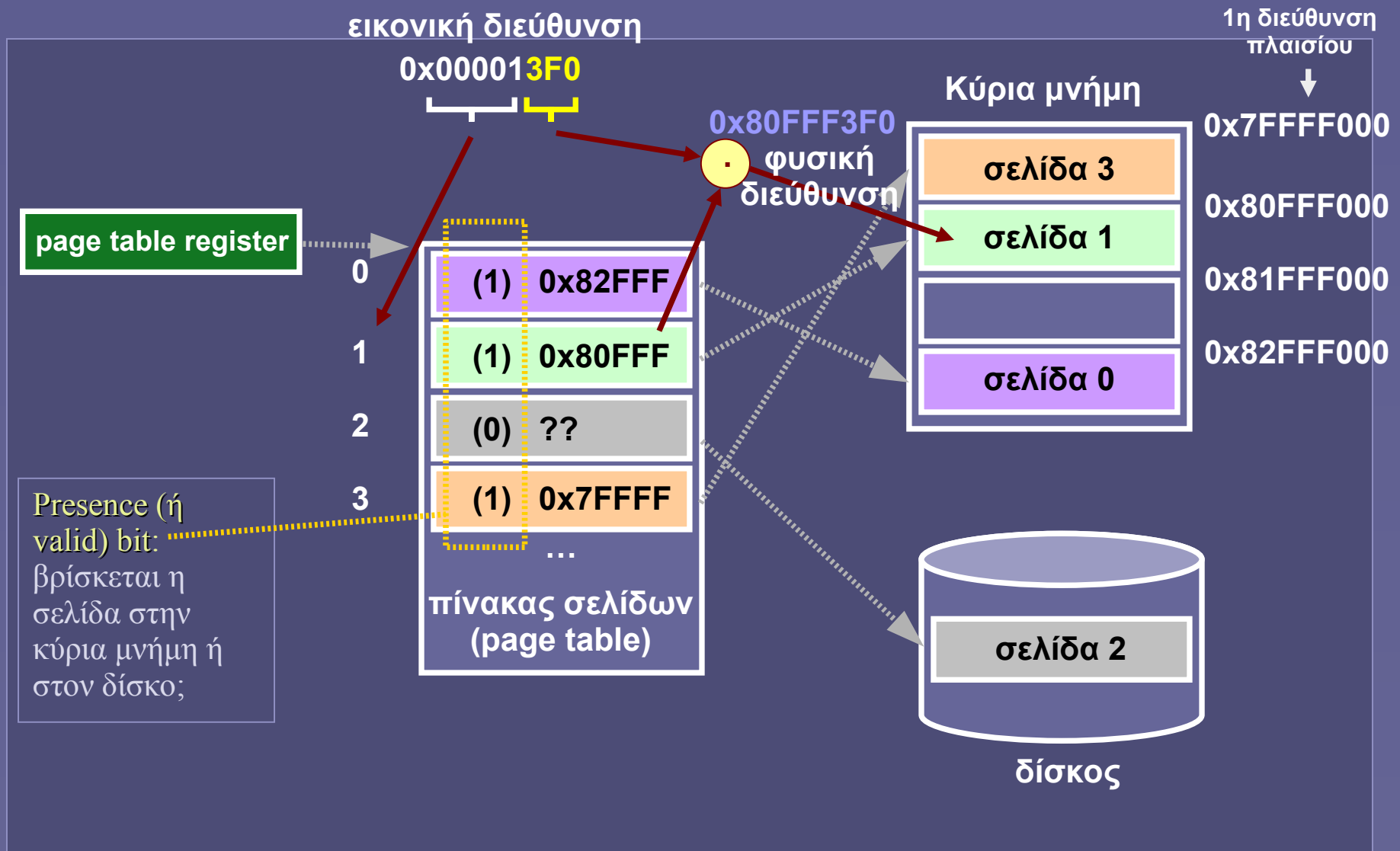
0x80FFFFFFF

Έστω ότι η σελίδα
0x00001 βρίσκεται
στη φυσική σελίδα
(πλαίσιο) 0x80FFF

Πίνακας σελίδων

- Η μονάδα διαχείρισης μνήμης (MMU) χρειάζεται τις **αντιστοιχίες** σελίδων και πλαισίων για τη μετάφραση από λογικές σε φυσικές διευθύνσεις
 - Στο προηγούμενο παράδειγμα: πώς γνωρίζει η μονάδα MMU ότι η σελίδα **0x00001** βρίσκεται στη φυσική σελίδα (πλαίσιο) **0x80FFF**;
- Οι αντιστοιχίες αυτές αποθηκεύονται σε έναν **πίνακα σελίδων** (page table)
 - Βρίσκεται στην κύρια μνήμη
 - **Page table register**: διεύθυνση αρχής του πίνακα
 - Έχει μέγεθος (θεωρητικά) ίσο με τον μέγιστο αριθμό σελίδων ενός προγράμματος – μια γραμμή πίνακα ανά σελίδα του προγράμματος
 - Διαχείριση από το λειτουργικό σύστημα

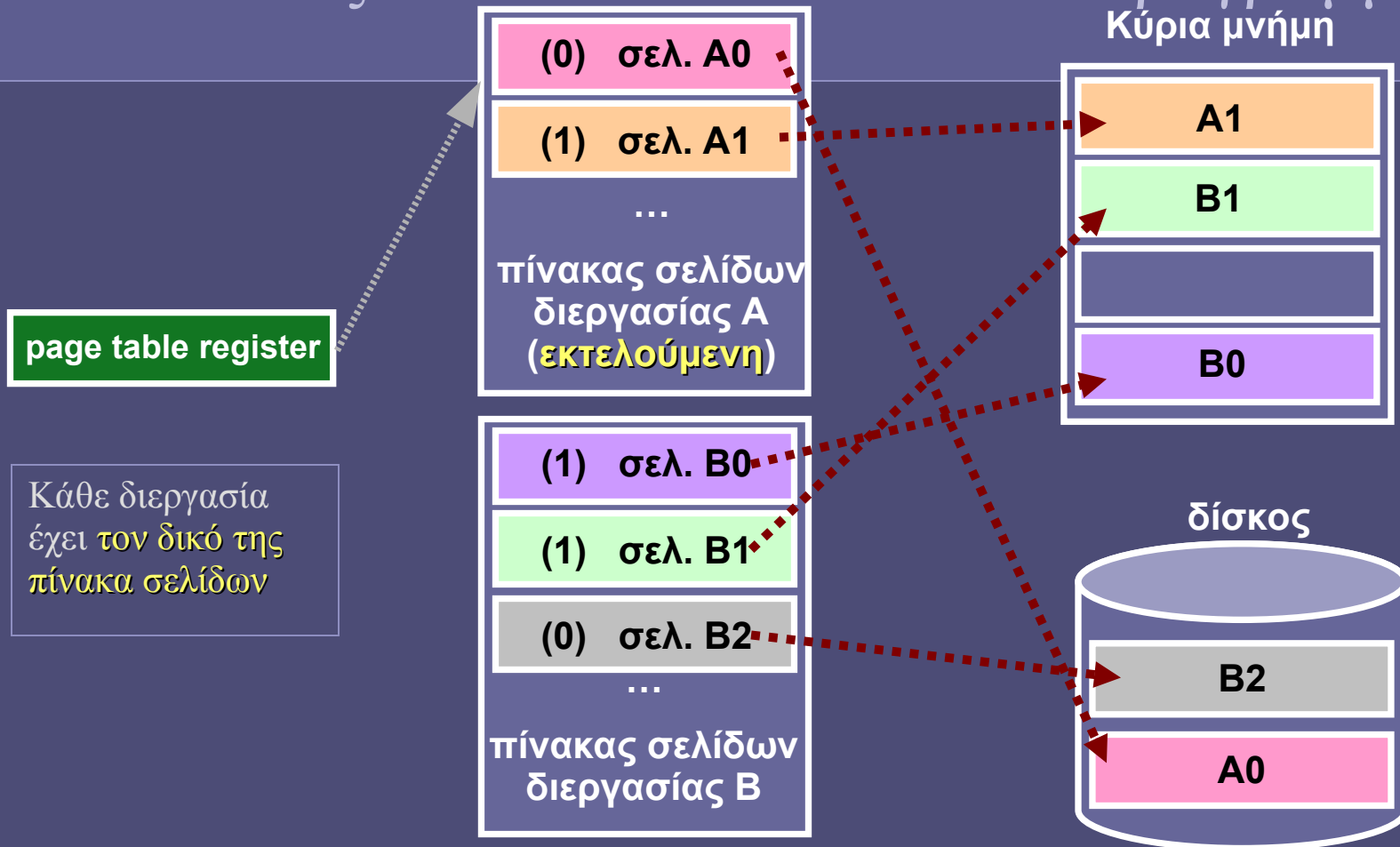
Μετάφραση λογικών διευθύνσεων



Πίνακας σελίδων (συνέχεια)

- **Πρόσθετη πληροφορία σε κάθε γραμμή του πίνακα σελίδων**
 - Presence (ή valid) bit
 - Βρίσκεται η σελίδα στη μνήμη ή στον δίσκο;
 - Dirty bit
 - Έχει γίνει εγγραφή δεδομένων στη σελίδα;
 - Accessed (ή reference ή use) bit
 - Ενημερώνεται από MMU σε κάθε προσπέλαση
 - Καταγράφεται σε τακτά διαστήματα από το ΛΣ για την υλοποίηση των αλγορίθμων LRU κατά την αντικατάσταση σελίδων
 - Μέγεθος σελίδας
 - Αν υποστηρίζονται εναλλακτικά μεγέθη
 - Δικαιώματα χρήσης σελίδας
 - read only/read write, user/supervisor ...
 - Ανάλογα με αρχιτεκτονική επεξεργαστή

Πίνακες σελίδων και πολλαπλά προγράμματα



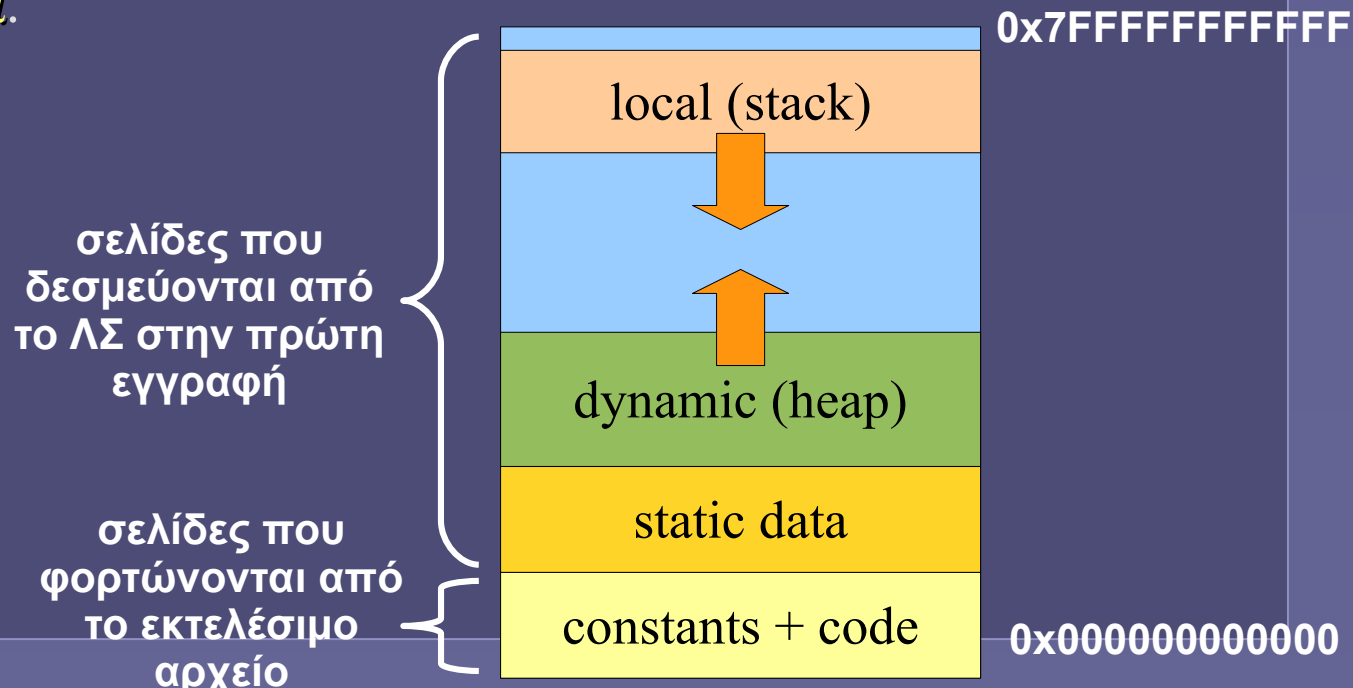
Εάν το λειτουργικό σύστημα φροντίσει να αντιστοιχίσει σωστά τις σελίδες κάθε προγράμματος σε διαφορετικές διευθύνσεις στην κύρια μνήμη, τότε **κανένα πρόγραμμα δεν μπορεί να προσπελάσει δεδομένα άλλου προγράμματος**

Εικονική Μνήμη και Προστασία Προσπέλασης

- Προστασία προσπέλασης σελίδων
 - Με διαφορετικούς πίνακες σελίδων ανά πρόγραμμα (διεργασία) είναι αδύνατη η προσπέλαση «ξένων» σελίδων
- User mode και Supervisor Mode
 - Σε user mode δεν είναι δυνατή η προσπέλαση του πίνακα σελίδων και των αντίστοιχων καταχωρητών
 - Υπάρχουν αρχιτεκτονικές με περισσότερα από 2 επίπεδα προνομίων
- Ελεγχόμενη προσπέλαση κώδικα ΛΣ
 - System call exceptions
 - Στο επίπεδο όμως των προνομίων του χρήστη → δεν είναι δυνατή η προσπέλαση «ξένων» δεδομένων

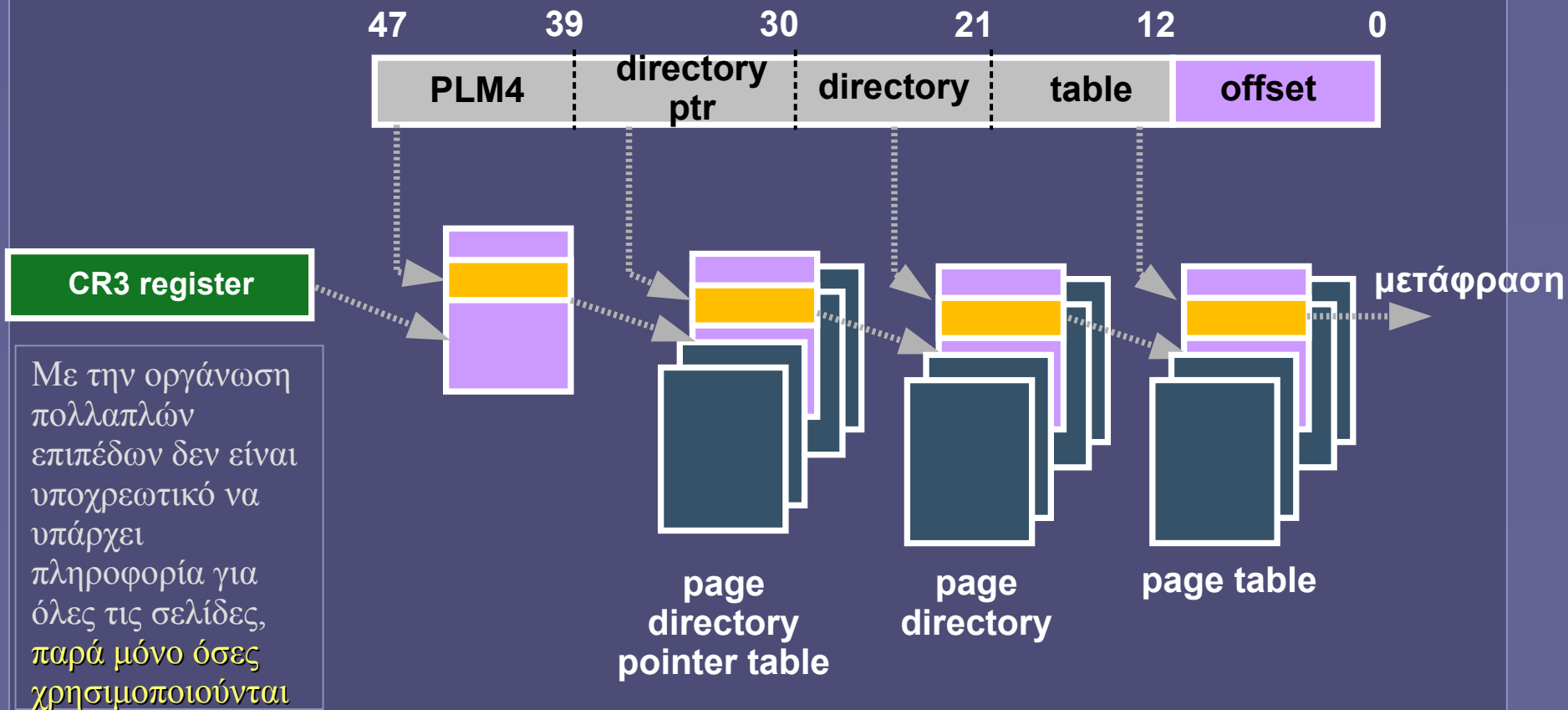
Μέγεθος πίνακα σελίδων

- Τα 64-bit προγράμματα μπορούν να «δουν» έναν πολύ μεγάλο χώρο λογικών διευθύνσεων
 - Π.χ. $0 \dots 0x7FFFFFFFFFFFFFFF = 128TB$
 - Δεν χρησιμοποιείται όλος ο χώρος διευθύνσεων
 - Δεν είναι δυνατό να έχουμε πίνακα σελίδων με γραμμές για κάθε πιθανή σελίδα.



Πίνακας σελίδων πολλαπλών επιπέδων

- Παράδειγμα: αρχιτεκτονική x86-64, σελίδα 4KB
 - 4 (ή και 5) επίπεδα πινάκων για 48-bit (ή 57-bit) διευθύνσεις



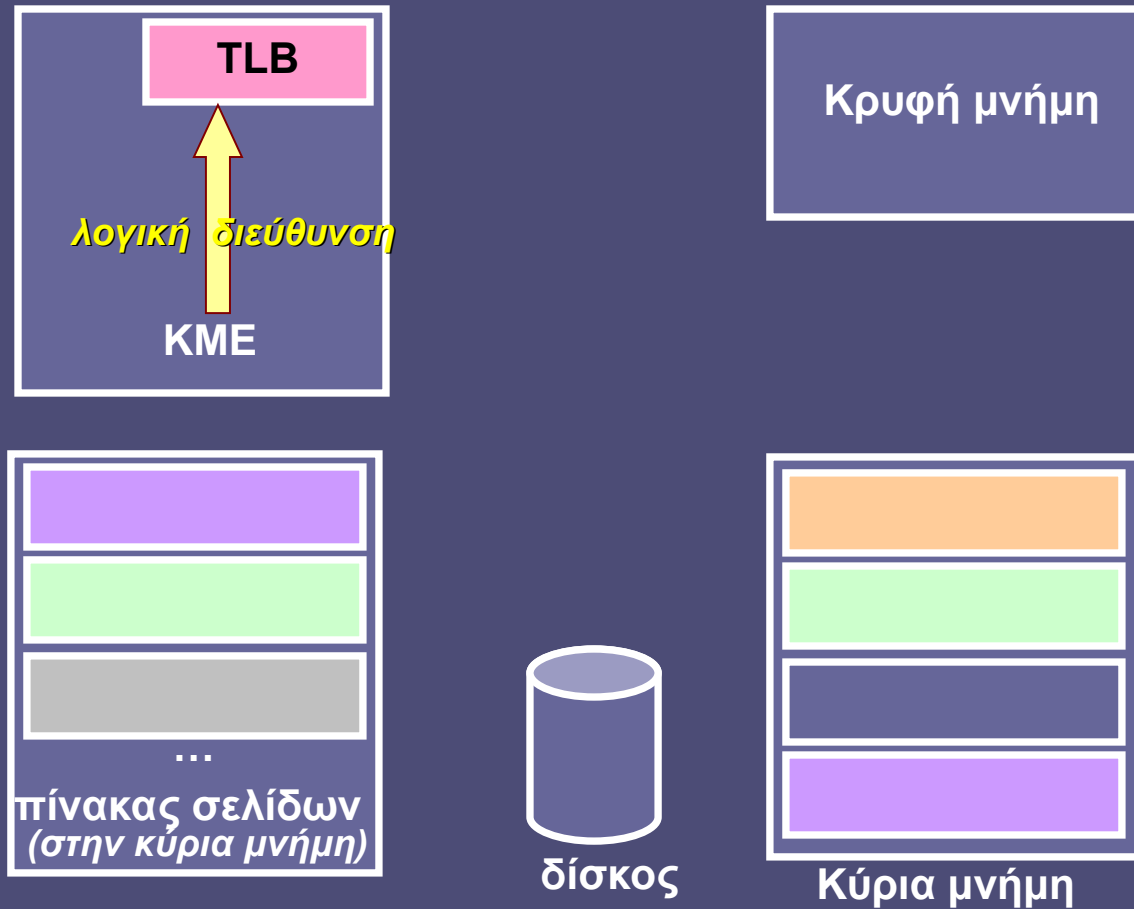
Translation-Lookaside Buffer

- Το πρόβλημα με τους πίνακες σελίδων
 - Βρίσκονται στην κύρια μνήμη
 - Για κάθε προσπέλαση μνήμης απαιτείται μια δεύτερη (τουλάχιστον) προσπέλαση στον πίνακα σελίδων, επίσης στη μνήμη
 - Μη αποδεκτή χρονική επιβάρυνση
- Translation-Lookaside Buffer (TLB)
 - Μικρή «κρυφή μνήμη» για πρόσφατες μεταφράσεις λογικών διευθύνσεων (στη μονάδα MMU)
 - Ο αριθμός σελίδας χρησιμοποιείται ως ετικέτα (tag)
 - Περιέχει μόνο έγκυρες σελίδες (όχι «απούσες»)
 - Διατηρείται συγχρονισμένη με πίνακες σελίδων από το ΛΣ
 - Κατά την εναλλαγή διεργασιών πρέπει να «αδειάζει»
 - Εναλλακτικά, χρήση ID διεργασίας μαζί με ετικέτα

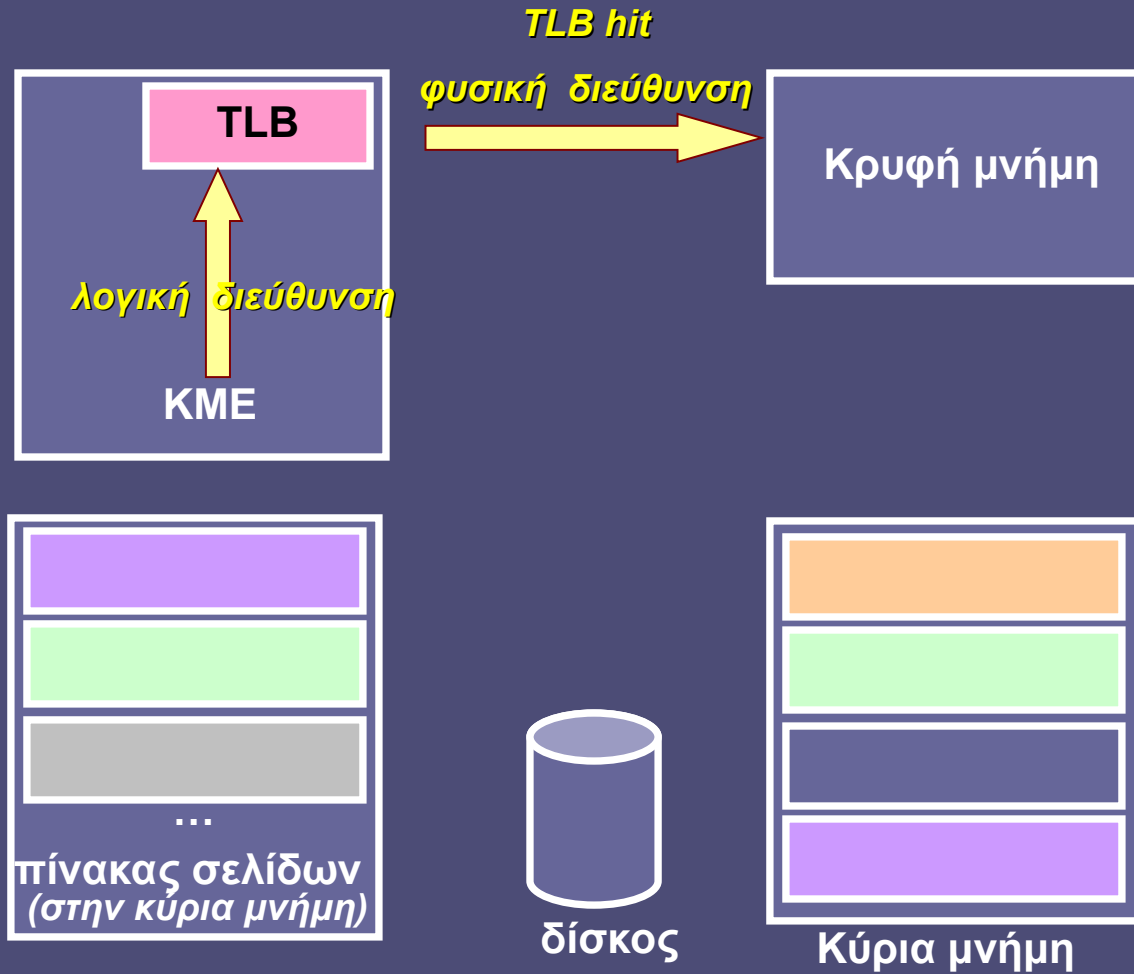
Translation-Lookaside Buffer (2)

- **TLB miss**
 - Προσπέλαση πίνακα σελίδων στη μνήμη και απόκτηση μετάφρασης που λείπει
 - Ενημέρωση από ΛΣ ή από την ίδια τη μονάδα MMU (“page table walking”)
- **Χαρακτηριστικά TLB**
 - Ξεχωριστά TLB για εντολές και δεδομένα
 - 16-512 θέσεις, 1-2 γραμμές του πίνακα σελίδων ανά θέση
 - Μικρό μέγεθος, τοπικότητα σελίδων πολύ μεγάλη
 - Συχνά πλήρως προσηταιριστικό
 - Προσπέλαση < 1 κύκλο ρολογιού
 - Παρατηρούμενο Miss rate: 0.01% - 1%
 - Όπως και στις πραγματικές κρυφές μνήμες, μπορεί να υπάρχει L1 και L2 TLB

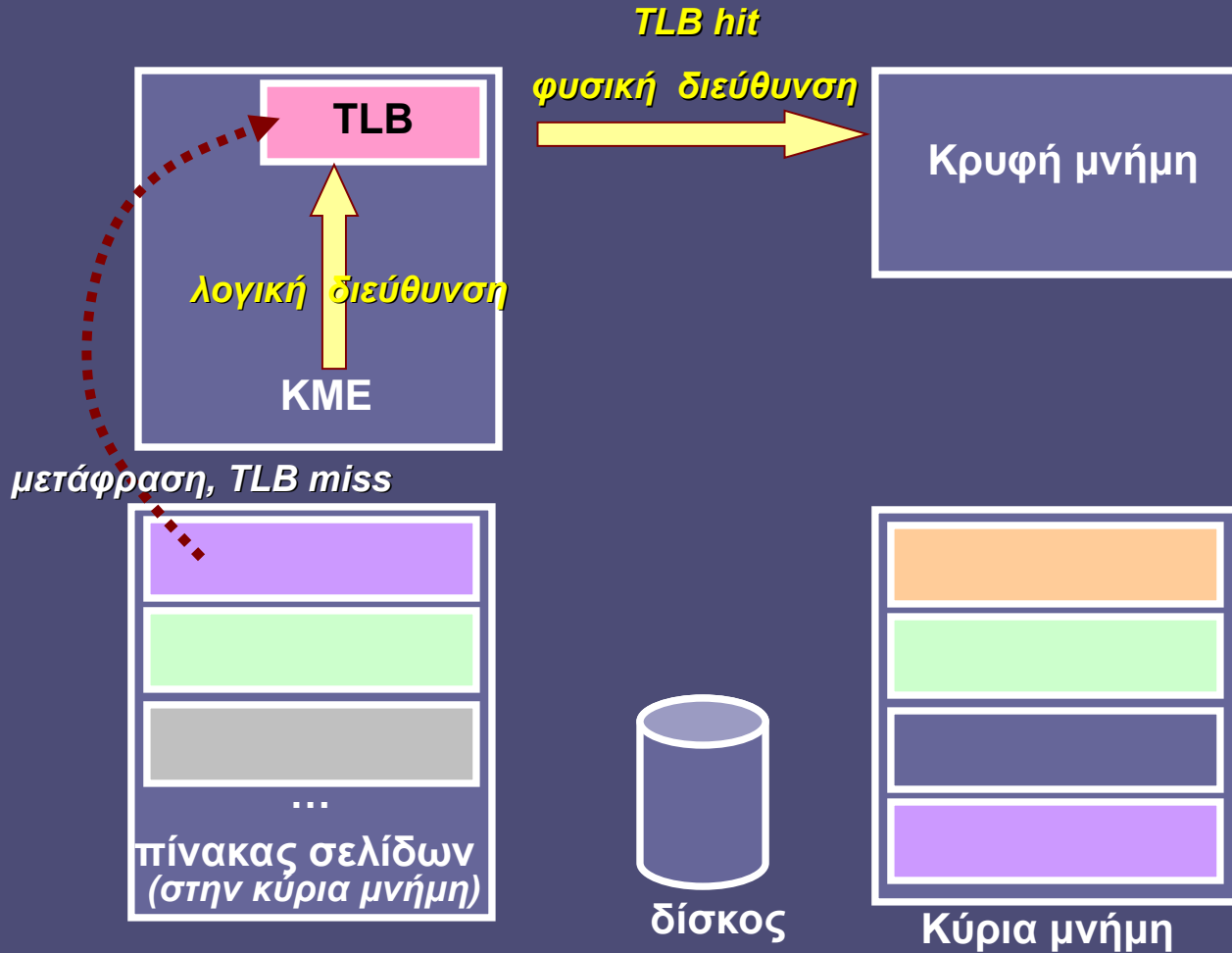
Προσπέλαση μνήμης: η συνολική εικόνα



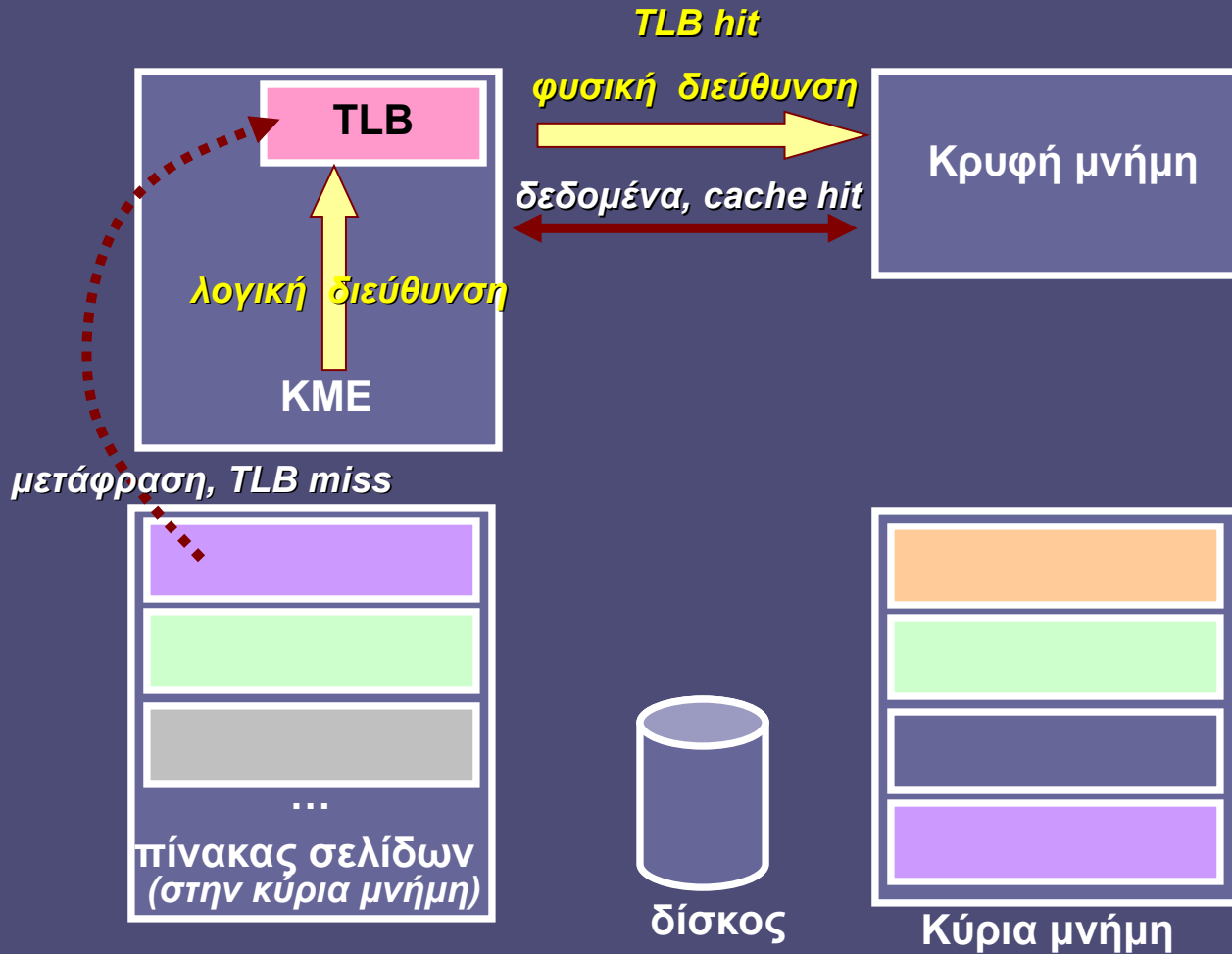
Προσπέλαση μνήμης: η συνολική εικόνα



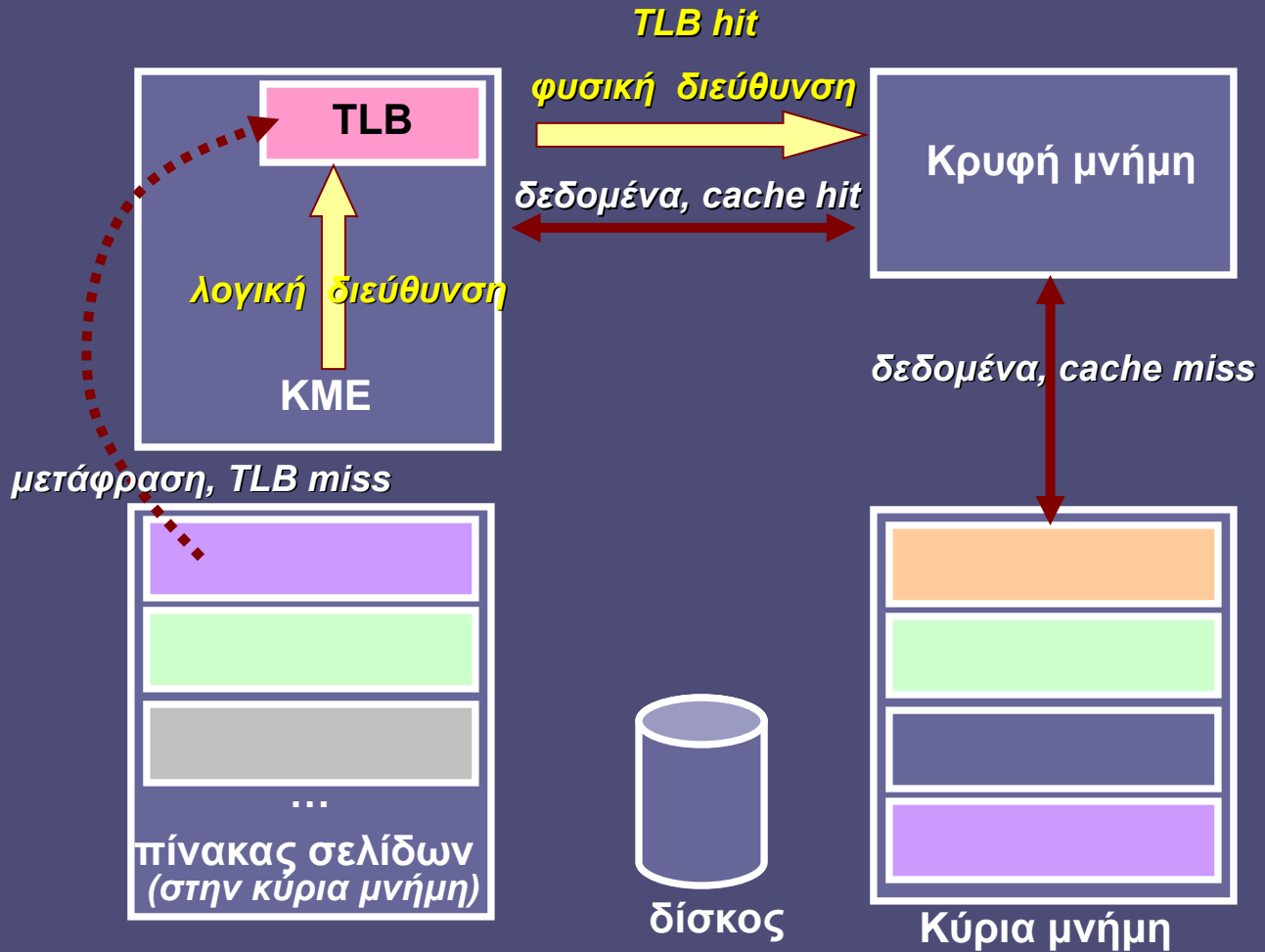
Προσπέλαση μνήμης: η συνολική εικόνα



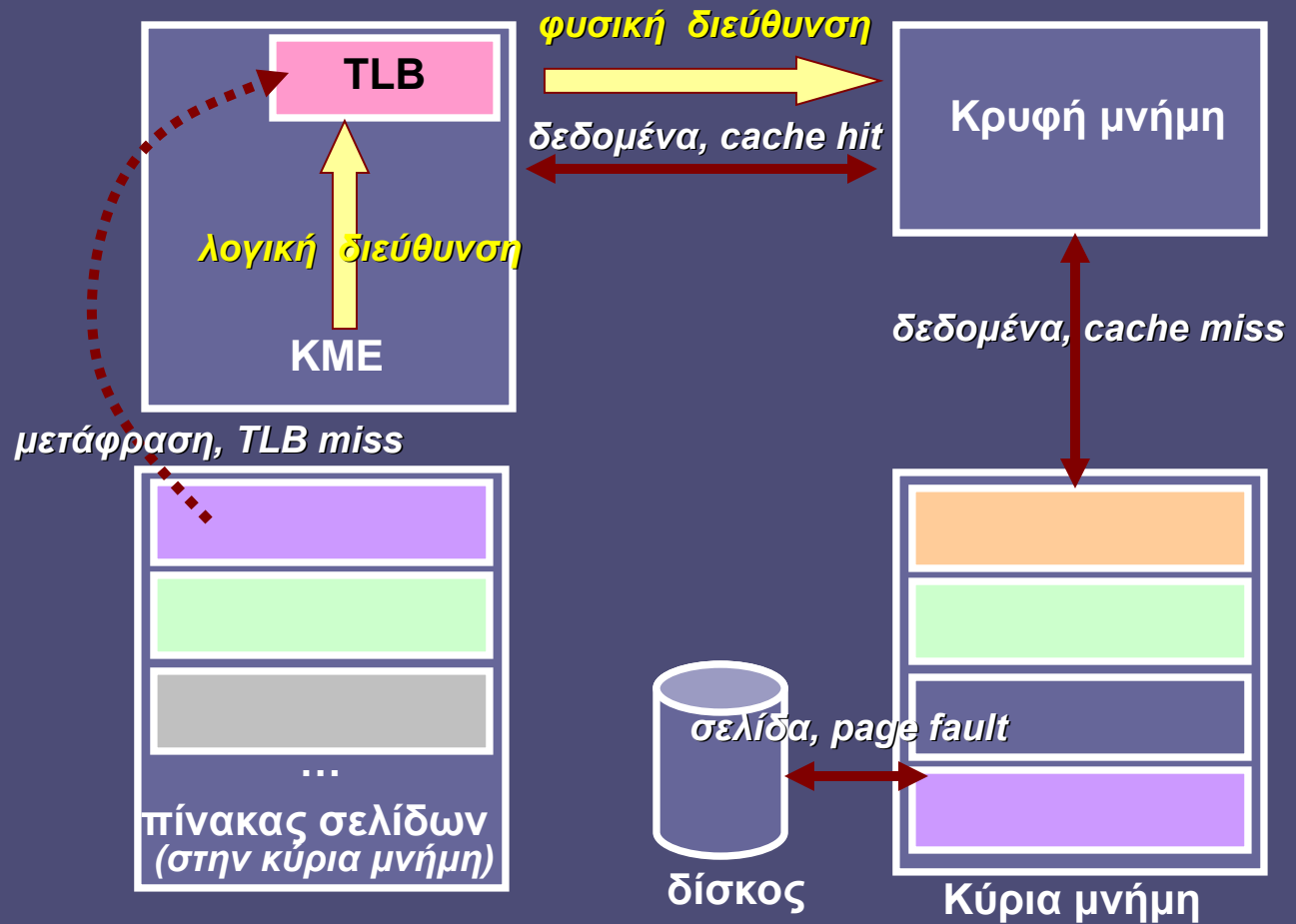
Προσπέλαση μνήμης: η συνολική εικόνα



Προσπέλαση μνήμης: η συνολική εικόνα



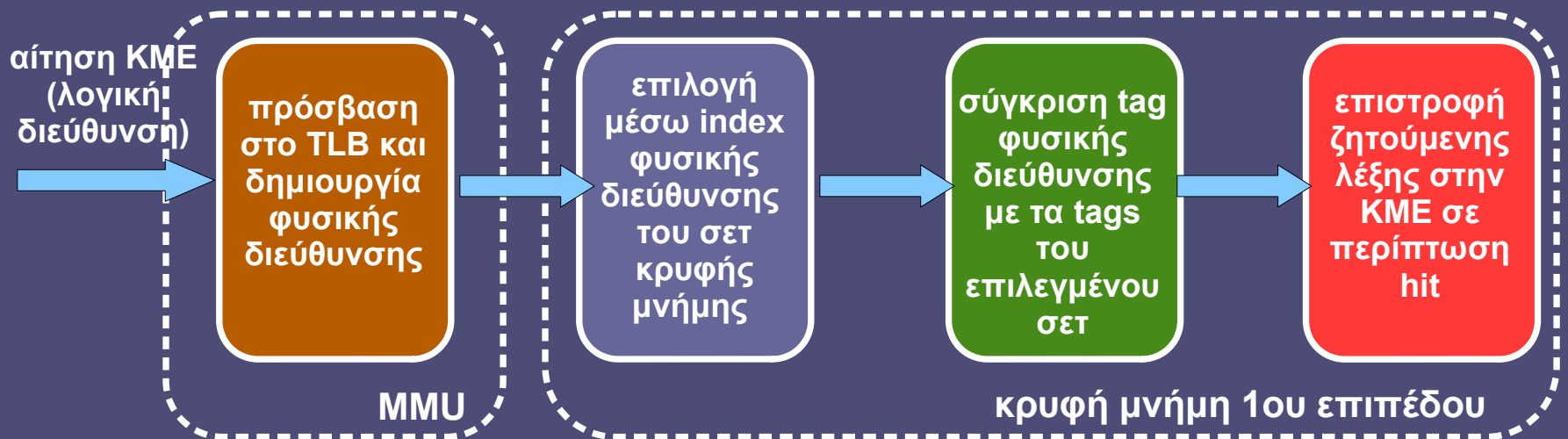
Προσπέλαση μνήμης: η συνολική εικόνα



TLB και κρυφή μνήμη 1ου επιπέδου

Η κρυφή μνήμη 1ου επιπέδου (κοντά στην ΚΜΕ) πρέπει να είναι **πολύ γρήγορη** σε περίπτωση hit

- Με την εισαγωγή της εικονικής μνήμης παρεμβάλλεται και το στάδιο της μετάφρασης από λογική σε φυσική διεύθυνση
- Πώς μπορούμε να επιταχύνουμε τη διαδικασία;



Virtually Indexed Physically Tagged (VIPT) caches

Αν εξασφαλίσουμε ότι το index είναι μέσα στο offset της λογικής διεύθυνσης, δεν χρειάζεται μετάφραση για να το χρησιμοποιήσουμε

- Το offset παραμένει ίδιο στη φυσική διεύθυνση

